

การศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเฮดต่ำด้วยวิธี  
การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

THE STUDY OF OPTIMUM PARAMETERS FOR LOW HEAD MICRO WATER  
TURBINE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล

WERAYOOT LAHAMORNCHAIYAKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
พ.ศ. 2552

การศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเฮดต่ำด้วยวิธี  
การวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
พ.ศ. 2552

**THE STUDY OF OPTIMUM PARAMETERS FOR LOW HEAD MICRO WATER  
TURBINE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**

**WERAYOOT LAHAMORNCHAIYAKUL**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN MACHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**2009**

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้ากำลังศึกษาอยู่ที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายวีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเสดต่ำด้วยวิธีการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
นักศึกษา	นายวีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล
รหัสนักศึกษา	115070403011-5
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.วิรัช โยชนรินทร์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเสดน้ำต่ำ โดยเน้นคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงสร้างและรูปทรงต่างๆของตัวกังหันน้ำ

ระบบการออกแบบ เริ่มต้นจากการคำนวณหารูปทรงเบื้องต้น และชิ้นส่วนต่างๆ ของกังหันน้ำ ได้แก่ ช่องทางน้ำเข้า โวลูตน้ำ และล้อกังหันน้ำ เมื่อได้รูปทรงครบถ้วน จึงนำไปทำการสร้างเมชสำหรับการคำนวณผลทางด้านพลศาสตร์ของไหล เพื่อทำการประเมินศักยภาพการทำงานของกังหันน้ำ โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลข การไหลของน้ำผ่านล้อกังหันน้ำ ซึ่งกังหันน้ำที่จำลองเป็นกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อเท่ากับ 310 มิลลิเมตร การจำลองเชิงตัวเลขนั้นกระทำโดยการใช้กรรมวิธีจำกัดปริมาตรในสามมิติ โดยทำการสร้างปริมาตรควบคุมให้กับล้อกังหันน้ำเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ในการหาผลเฉลยการทำงาน จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ( $k - \varepsilon$ ) ผลจากการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคำนวณผลทางด้านพลศาสตร์ของไหล มีความสอดคล้องกับภาคทฤษฎี โดยค่าแรงบิดมีการเปลี่ยนไปตลอดเวลา ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเร็วสัมพัทธ์และมุม ประทะที่เข้าสู่หน้าตัดล้อกังหันน้ำ ผลเฉลยจากการคำนวณนี้สามารถนำค่าตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากโปรแกรมมาทำการปรับใช้กับการออกแบบล้อกังหันน้ำและโวลูตน้ำให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมต่อการทำงาน จากผลการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลพบว่า การไหลของน้ำผ่านล้อกังหันน้ำขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมคำนวณผลทางด้านพลศาสตร์การไหล สรุปได้ว่าที่มุม 60 องศาของโวลูตน้ำ จะได้แรงบิดสูงสุด 15 นิวตันเมตร ที่ความเร็วรอบล้อกังหันน้ำ 310 รอบต่อวินาที นั่นคือพลังงานที่ความสูงของเสดน้ำ 4 เมตรน้ำ จะได้พลังงานทางไฟฟ้าได้ประมาณ 490 วัตต์ ผลจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากกังหันน้ำต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นมา เพื่อทำการทดสอบจริง ได้ผลการทดสอบโดยการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิดและรอบการหมุน ได้แรงบิดจริงประมาณ 12.89 นิวตันเมตร ที่ความเร็วรอบการ

หมุน 296 รอบต่อนาที และได้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด 400 วัตต์ เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหล และการทดสอบต้นแบบ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ จากผลการศึกษาในครั้งนี้ สรุปได้ว่า สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลได้สำหรับการออกแบบ และการพัฒนาระบบการทำงานต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กได้ ต่อไป

**คำสำคัญ:** กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า, การคำนวณผลทางด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์  
แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$

**Thesis Title:** THE STUDY OF OPTIMUM PARAMETERS FOR LOW HEAD  
MICRO WATER TURBINE USING COMPUTATIONAL FLUID  
DYNAMICS (CFD)

**Student Name:** Mr. Werayoot Lahamornchaiyakul

**Student ID:** 115070403011-5

**Degree Award:** Master of Engineering

**Student Program:** Mechanical Engineering

**Academic Year:** 2009

**Thesis Advisor/s** Dr. Wirachai Roynarin

### ABSTRACT

The objective of this study is to design and to analyze low head micro water turbine with emphasis on finding optimum parameters for the design of the water turbine structure. The system was design, analyzed, and calculated for the suitable geometries of the water inlet, volute, and wheel of the water turbine. The computational fluid dynamics technique was used in this study by using commercial software. The appropriated mash of each model section was generated for fluid dynamics computation. The diameter of the water turbine wheel in the numerical model was 310 mm. The water turbine model was analyzed by varying water flows through the turbine wheel. The control volume technique was used in the numerical method. The (k-epsilon) turbulence model was used to find the computational results.

The numerical analysis result shows that the torque from the water turbine modeling is varied depending on the time domains and related to speed relatively from the developed force. The numerical result showed the height efficiency of generated torque at 60 degree of water attacking to the turbine blade. The model gives 15 N.m torque at 310 rpm which in turn provides 490-watt power output. The CFD predicted parameter leads to make the prototyping, and the result of analytical an experimental models was compared thereafter.

After the prototype was setup, the test result showed that at 60 degree angle of water attacking produces 12.89 N.m torque at 310 rpm. Therefore, the prototype generated 400 watt power output. The comparison of CFD and prototype test results indicated 18 percent errors. Therefore, this study can be used to study low head water turbine. Nevertheless, the improvement of higher performance would be needed for development of better low head water turbine system.

**Keywords:** Water Turbine Generator, Computational Fluid Dynamics,  $k - \epsilon$  Turbulence Model

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.วิรัช ไรยนรินทร์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดระยะเวลาทำงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.เทอดเกียรติ ลิ้มปีทีปการ ดร.มนุศักดิ์ จานทอง และดร.ธีระ เกียรติพงษ์กุล ที่กรุณาเสียสละเวลามา เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบิดา มารดา ผู้มีพระคุณยิ่งที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดศาสตร์ความรู้ทางด้านวิชาการต่างๆ ให้แก่ข้าพเจ้า รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่คอยให้ความสะดวกในด้านงานเอกสารและการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่คอยให้คำปรึกษาในงานด้านเอกสารต่างๆ ตลอดหลักสูตร

ขอบคุณคุณพลอยไพลิน วรรณภูมิประเสริฐ ที่คอยให้คำปรึกษาด้านงานเอกสารต่างๆ และกำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีความก้าวหน้าและสำเร็จได้ในที่สุด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก และการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หากงานวิจัยนี้เกิดข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าต้องขออภัยเอาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล

24 สิงหาคม 2552

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.5 วิธีการวิจัย	5
1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กังหันน้ำ	7
2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล	11
2.3 วิธีการหาประสิทธิภาพรวมและการสูญเสีย	27
2.4 การคำนวณตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	34
2.5 การหาค่าความเร็วขอบล้อ (Tip Speed Ratio)	35
2.6 การหาค่าการหาโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)	36
บทที่ 3 วิธีเตรียมการและการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล	
3.1 กรอบและแนวคิดในการศึกษา	37
3.2 การคำนวณค่าตัวแปรเบื้องต้น	38
3.3 การสร้างเมช	40
3.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา	42
3.5 การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล	44
3.6 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วรอบการหมุนแบบ (Free Spinning)	47
3.7 การหาค่าความเร็วขอบใบ (Tip Speed Ratio)	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8 การคำนวณผลทาง (CFD) เพื่อหาแรงบิด	52
3.9 ผลเฉลยของคำตอบในลักษณะต่างๆ ในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าที่มุมมองต่างๆ	58
บทที่ 4 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างต้นแบบกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้าและการสร้าง ต้นแบบกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า	
4.1 กังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า	68
4.2 การออกแบบโครงสร้างและดำเนินการสร้าง	73
บทที่ 5 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของกังหันน้ำและเปรียบเทียบผลการทดสอบ	
5.1 กรณีการศึกษาที่ 1	76
5.2 กรณีการศึกษาที่ 2	76
5.3 การวิเคราะห์การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (Head Loss Due to Friction)	81
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 บทสรุป	88
6.2 ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารอ้างอิง	92
ภาคผนวก	
ก แบบงานก่อสร้างโครงสร้างกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า	94
ข ผลวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลภายในกังหันน้ำ	102
ค ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์	114
ประวัติผู้เขียน	133

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสูงของหัวน้ำและประสิทธิภาพการทำงาน	11
2.2 ฟลักซ์ (Flux) ของโมเมนตัมจะเกิดขึ้นที่ผิวทั้ง 6 ด้าน	22
2.3 ค่าความขรุขระภายในผิวท่อสำหรับท่อใหม่	29
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของบอวลวาล์ว	33
2.5 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน $K = \frac{h_m}{v_1^2 / 2g}$ สำหรับวาล์วที่เปิด ช้องอ และสามทาง	33
2.6 ค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากการเปิดวาล์ว	34
3.1 ผลการคำนวณรอบการหมุนทาง (CFD) โดยอาศัยการปรับค่าเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา	49
3.2 สรุปผลการคำนวณรอบการหมุนที่มุม วาล์วต่างๆ (CFD)	51
3.3 แรงบิดใช้งานทุกรอบการคำนวณ เปรียบเทียบทุกมุมมอง (CFD)	55
3.4 ผลการเปรียบเทียบมุมท่อเจ็ทน้ำกับแรงบิด (CFD)	56
3.5 ผลการคำนวณพลศาสตร์ของไหลของกังหันน้ำที่มุมมองวาล์วที่แตกต่างกัน (CFD)	66

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ส่วนประกอบของกังหันพลังน้ำ (CFHT)	3
1.2 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 200-300 วัตต์	4
1.3 ส่วนประกอบและการทดสอบกังหันน้ำ	4
2.1 ลักษณะการประกอบกังหันน้ำแบบ Banki Turbine	8
2.2 ลักษณะการทำงานของ Banki Turbine	8
2.3 ตัวอย่างของกังหันน้ำเพลตัน	9
2.4 ตัวอย่างกังหันน้ำเทอร์โก	9
2.5 ตัวอย่างกังหันน้ำฟรานซิส	10
2.6 ตัวอย่างกังหันน้ำเคปแลน	10
2.7 ตัวอย่างกังหันน้ำเคเรียซ	11
2.8 ปริมาตรควบคุม	12
2.9 ค่าความเร็ว $u$ ในการไหลแบบปั่นป่วน	16
2.10 Element ของปริมาตรควบคุมคงที่ในคาร์ทีเซียนโคออร์ดิเนต	20
2.11 Element ของปริมาตรควบคุมคงที่ในคาร์ทีเซียนออร์ดิเนต	22
2.12 ความเค้นที่กระทำต่อ Element	24
2.13 Element ของปริมาตรควบคุมคงที่โดยแสดง Surface Force ในแนวแกน x	24
2.14 เส้นเสดกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า	28
2.15 ความขรุขระของผนังท่อ	29
2.16 มูดีไดอะแกรม (Moody Diagram)	30
2.17 ส่วนประกอบของระบบท่อ	31
2.18 ทางเข้า	31
2.19 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่ทางเข้าและทางออก	32
2.20 ทางออก	32
2.21 ท่อโค้งและการหาค่า K	32
2.22 แสดงถึงตัวอย่างค่าสมรรถนะของกังหัน	36
3.1 ลักษณะของเจ็ทน้ำ	38
3.2 ระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก	40
3.3 ลักษณะเมฆของล้อยกังหันน้ำ	41
3.4 ลักษณะเมฆของโวลูตกังหันน้ำ	41
3.5 ลักษณะเมฆของระบบล้อยกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า	42



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณผล	43
3.7 เงื่อนไขขอบเขตล่อกัณฑ์น้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า	43
3.8 หน้าต่างโปรแกรม CFdesign V9	45
3.9 การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) ในโปรแกรม CFdesign V9	46
3.10 ผลการกระจายความดันภายในโวลูตกัณฑ์น้ำ	47
3.11 สนามความเร็วภายในโวลูตกัณฑ์น้ำ	47
3.12 เอลิเมนต์ที่ถูกปรับค่าแฟคเตอร์ก่อนการคำนวณ	48
3.13 ผลลัพธ์การคำนวณผลแบบ Free Sprinting ในการหาค่าความเร็วรอบการหมุน ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFdesign V9)	50
3.14 กราฟการปรับเอลิเมนต์ และ แสดงโปรไฟล์เปรียบเทียบผล (CFD)	50
3.15 การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) ในโปรแกรม CFdesign V9	53
3.16 ผลเฉลยของเวกเตอร์ความเร็วในสนามการไหล	54
3.17 ผลคำตอบที่คำนวณได้ทาง CFD ที่ 100 รอบการคำนวณในการหาแรงบิดใช้งาน	54
3.18 แรงบิด (Torque) ที่มุม 60 องศา	55
3.19 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดที่มุมองศาต่างๆของโวลูตกัณฑ์น้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (CFD)	56
3.20 ผลการเปรียบเทียบมุมต่อเจ็ทน้ำกับแรงบิดจาก (CFD)	57
3.21 ผลเฉลยของแรงกระทำต่อล่อกัณฑ์น้ำที่มุม 30 องศา	58
3.22 ผลเฉลยของแรงกระทำต่อล่อกัณฑ์น้ำที่มุม 40 องศา	59
3.23 ผลเฉลยของแรงกระทำต่อล่อกัณฑ์น้ำที่มุม 50 องศา	60
3.24 ผลเฉลยของแรงกระทำต่อล่อกัณฑ์น้ำที่มุม 60 องศา	61
3.25 ผลเฉลยของแรงกระทำต่อล่อกัณฑ์น้ำที่มุม 70 องศา	62
3.26 ผลเฉลยของความดันในรูปสนามการไหล	63
3.27 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 30 องศา	64
3.28 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 40 องศา	64
3.29 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 50 องศา	65
3.30 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 60 องศา	65
3.31 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 70 องศา	66
4.1 ล่อกัณฑ์น้ำ	68
4.2 ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	69
4.3 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นรูป	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 อุปกรณ์วัดค่าโปรไฟล์การไหลและแรงบิด (Rotary Torque Sensor)	70
4.5 การต่อ Torque Transducer ที่ต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์	70
4.6 วิธีการเชื่อมต่อระบบเข้ากับคอมพิวเตอร์	71
4.7 (ก) ตำแหน่งการวาง Generator (ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า Generator	72
4.8 โวลูตน้ำ	72
4.9 (ก) ท่อเจ็ทน้ำ (ข) ท่อเจ็ทน้ำด้านทางเข้าใบพัด (Top View)	73
4.10 บอลวาล์ว (Ball Valve)	73
4.11 การวิเคราะห์โครงสร้างทางไฟไนต์เอลิเมนต์	74
4.12 รูปต้นแบบกังหันน้ำขนาดเล็กและการออกแบบ	74
4.13 การวางท่อ	75
4.14 แสดงองค์ประกอบรวมของกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า	75
5.1 การเชื่อมต่อ (Torque Transducer) เข้ากับคอมพิวเตอร์	77
5.2 การต่อ Resister เข้ากับระบบการทำงาน	77
5.3 (ก) การทดสอบต้นแบบกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า	77
(ข) การทดสอบโดยใช้โปรแกรม CFdesign V9	77
5.4 หน้าต่างของโปรแกรม Torque View	78
5.5 หน้าต่างของโปรแกรมหลังทำการทดสอบ	78
5.6 ชุดแผงวงจรไฟฟ้าที่ใช้เป็นภาระโหลดในการทดสอบกังหันน้ำ	79
5.7 องค์ประกอบของระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก	79
5.8 หน้าต่างของโปรแกรมหลังทำการทดสอบ โดยใช้แผงโหลดไฟ	80
5.9 การทำงานของภาระทางไฟฟ้า	80
5.10 โปรไฟล์การไหลด้วย Torque Transducer การทดสอบโดยใช้แผงโหลดไฟ	80
5.11 ใช้ในการคำนวณหาความเร็วน้ำที่ตำแหน่งการไหลในระดับน้ำต่าง ๆ	82
5.12 ใช้ในการคำนวณหาค่าความดันและการสูญเสียที่หัวฉีด (Nozzle)	84
5.13 ผลการเปรียบเทียบของค่ากำลังงานทางไฟฟ้า	87

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$k$	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน	$m^2 / s^2$
$N$	ความเร็วรอบในการหมุน	$rpm$
$N_s$	ความเร็วจำเพาะ	-
$p$	ความดัน	$pa$
$Q$	อัตราการไหล	$m^3 / s$
$r$	รัศมี	$m$
$T$	แรงบิด	$N.m$
$t$	เวลา	$s$
$u$	ความเร็วของของไหลในระนาบแกน x	$m / s$
$v$	ความเร็วของของไหลในระนาบแกน y	$m / s$
$w$	ความเร็วของของไหลในระนาบแกน z	$m / s$
$g$	ค่าคงที่แรงโน้มถ่วงของโลก	$m / s^2$
$H$	ความสูงของหัวน้ำ	$m$
$A$	พื้นที่หน้าตัด	$m^2$
$\varepsilon$	อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน	-
$\theta$	มุม	$rad$
$\rho$	ความหนาแน่น	$kg / m^3$
$\sigma$	ความเค้น	$N / m^2$
$\omega$	ความเร็วเชิงมุม	$rad / s$
$\tau$	ความเค้นเฉือน	$N / m^2$
$\mu$	ความหนืดของของไหล	$kg / m.s$
Re	ค่าเรย์โนลด์	-
$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ	$N / m^3$
$\eta$	ประสิทธิภาพ	%
$p_e$	กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันน้ำ	$kW$
$p_i$	กำลังของน้ำที่ให้แก่งกังหันน้ำ	$kW$
$h_w$	เฮดที่ออกแบบในการคำนวณหา กำลังติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า	$m$
$h_{nozzle.l}$	การสูญเสียเฮดเนื่องจากหัวฉีด	$m$
$C_v$	ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วที่ออกจากหัวฉีด	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$v_f$	ความเร็วของน้ำที่ออกจากหัวฉีด	$m / s$
$A_{nozzle}$	พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด	$m^2$
$h_{net}$	เฮดก่อนเข้าหัวฉีด	$m$
$h_{ef}$	เฮดหลังผ่านหัวฉีด	$m$
$\lambda$	ค่าความเร็วปลายปีก (Tip Speed Ratio)	-
$f_{Coriolis}$	ค่าความแตกต่างของความเร็วในการหมุน	-
$f_{Centripetal}$	ค่าความเร่งที่วิ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางความโค้ง	-
$k - \varepsilon$	แบบจำลองความปั่นป่วน ( $k - epsilon$ )	-
$h_m$	การสูญเสียตรง	$m$
$h_L$	การสูญเสียเนื่องจากความยาวท่อ	$m$
$h_f$	การสูญเสียพลังงานรวมจากความเสียดทาน	$m$
$D$	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ	$m$
$K$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียตรง	-

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันมนุษย์ได้ใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นทำให้ทรัพยากรบนโลกลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากวิทยาการบนโลกเจริญเพิ่มมากขึ้น เพราะเหตุนี้จึงทำให้มนุษย์มีความต้องการที่จะใช้พลังงานนี้เพิ่มมากขึ้นทุกปี เพื่อเป็นสิ่งแวดล้อมความสะดวกต่างๆ กับการดำรงชีวิตในแต่ละวัน แต่สิ่งนี้ทำให้พลังงานที่มีบนโลกลดลงอย่างรวดเร็ว จึงมีนักวิทยาศาสตร์และนักวิศวกรรมศาสตร์หลายแขนง คิดหาพลังงานทางเลือกต่างๆ เพื่อนำมาทดแทนพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน ทั้งพลังงานน้ำ แสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานชีวมวล เป็นต้น พลังงานจากธรรมชาติเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่มีวันหมด นักวิทยาศาสตร์ต่างๆ จึงได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องมือต่างๆ ที่จะนำมาทำการเปลี่ยนรูปพลังงานธรรมชาติ ให้เป็นพลังงานที่ใช้ได้ในปัจจุบัน เช่น พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ พลังงานจากไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

จากที่ได้กล่าวมายังมีพลังงานทางเลือกอีกประเภทหนึ่งนั่นคือ พลังงานน้ำ ซึ่งพลังงานน้ำเป็นพลังงานที่สามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและมีจำนวนมาก ประเทศไทยจึงนิยมนำมาทำการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันของไทยยังมีต้นทุนในการผลิตสูง เพราะต้องสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำเพื่อนำน้ำที่ได้จากการกักเก็บ มาทำการผลิตกระแสไฟฟ้า การศึกษาวิจัยนี้จึงได้คิดค้นต้นแบบและอุปกรณ์ต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ เพื่อนำกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กนี้มาทดแทนการผลิตไฟฟ้าที่มีต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่สูงในปัจจุบัน

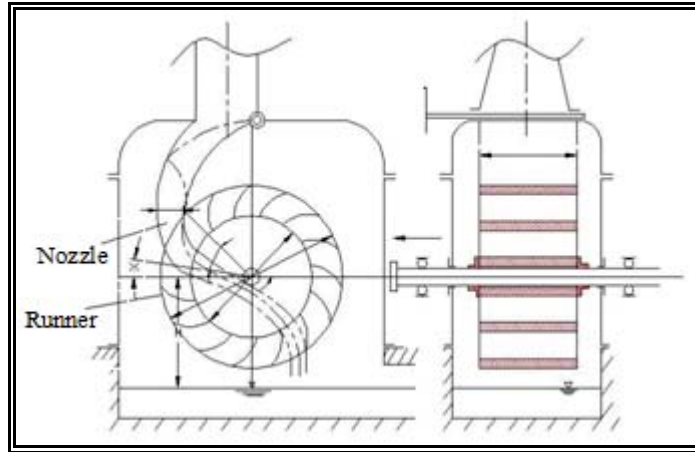
กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นเครื่องจักรที่ทำงานบนหลักของเครื่องจักรกลกังหัน (Turbo Machinery) สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทำการปล่อยน้ำที่อยู่ใต้อ่างเก็บน้ำที่อยู่สูงจากพื้น 4 เมตรน้ำ โดยทำการปล่อยน้ำลงมาตามท่อส่งน้ำซึ่งทำมุม 60 องศา ให้มาปะทะกับหน้าตัดล้อยก้านน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างอ่างเก็บน้ำ ซึ่งระบบของล้อยก้านน้ำนั้น ล้อยก้านน้ำจะติดอยู่กับเพลาลูกเบี้ยวและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เมื่อทำการปล่อยน้ำลงมา ความเร็วของน้ำจะมาปะทะกับพื้นที่หน้าตัดล้อยก้านน้ำ แรงที่เกิดขึ้นจากน้ำจะส่งผลทำให้ล้อยก้านน้ำเกิดการหมุนเมื่อล้อยก้านน้ำเริ่มหมุน ระบบในการส่งกำลังจะเกิดขึ้นล้อยก้านน้ำที่ติดอยู่กับเพลาลูกเบี้ยวจะส่งกำลังไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้า จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า ความสูงของหัวน้ำเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของเครื่องกลกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า ดังนั้นในการส่งถ่ายพลังและเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังกลทางไฟฟ้าจึงมีความสำคัญในการออกแบบให้ได้ต้นแบบของกังหันน้ำที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุด

การออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กให้มีสมรรถนะและประสิทธิภาพสูง ต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น กระบวนการออกแบบเริ่มต้นจากการกำหนดคุณลักษณะและประสิทธิภาพของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก แล้วคำนวณองค์ประกอบต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ได้แก่ ความสูง ความเร็วน้ำ ความแข็งแรงของโครงสร้างต่างๆ เป็นต้น การคำนวณหาอัตราการไหล เพื่อจำลองสนามการไหลของน้ำผ่านล้อยังกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อคำนวณหาค่าแรงบิด (Torque) เบื้องต้น เราใช้ทฤษฎีทาง CFD (Computational Fluid Dynamics) ร่วมกับโปรแกรม CFXdesign V9 และนำค่าที่ได้จากโปรแกรม CFXdesign V9 มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงทางปฏิบัติเพื่อหาประสิทธิภาพที่แท้จริง เพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนากังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กต่อไป

## 1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์การไหลภายในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจะต้องอาศัยความรู้ที่เกี่ยวข้องจากแขนงวิชาต่างๆ เช่น การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล, กลศาสตร์ของไหล, ไฟไนต์เอลิเมนต์ ภาคพลศาสตร์ของไหลและบทความทางวิชาการต่างๆ ที่มีผู้วิจัยได้นำเสนอโดยเน้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังนี้

Barglazan, M. [1] ศึกษาถึงองค์ประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์การไหลภาคการคำนวณภายในกังหันพลังน้ำ หรือ Cross-Flow Hydraulic Turbines (CFHT) ขึ้นตอนในงานวิจัยนี้ได้ประกอบไปด้วยหลักการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์เอาไว้ 2 ส่วนใหญ่ๆ คือทำการออกแบบระบบการไหลโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้รูปร่างทางเรขาคณิตของกังหันน้ำที่เหมาะสม และทำการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติโดยการใช้โปรแกรมในการกำหนดตัวแปรต่างๆ ทางพลศาสตร์การไหลหลายตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในการคำนวณ การไหลในกังหันพลังน้ำจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนในเครื่องจักรกลการไหล กล่าวคือล้อยังกังหันน้ำและหัวฉีด ซึ่งกังหันพลังน้ำจะมีคุณสมบัติเฉพาะทางที่มีอยู่ในตัวกังหันน้ำอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามกังหันพลังน้ำมีความสัมพันธ์กันระหว่างอัตราการไหลของกังหันพลังน้ำและความเร็วรอบการหมุนของล้อยังกังหันน้ำ ความกว้างของล้อยังกังหันน้ำจะเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดอัตราการไหลของกังหันน้ำ โดยในระบบต่างๆ ภายในกังหันพลังน้ำจะมีบางส่วนของวงล้อยังกังหันน้ำที่จมลงในน้ำ ล้อยังกังหันน้ำจะติดอยู่กับเพลลาที่ประกอบอยู่กับโวลูต และจะส่งน้ำมาทางช่องแคบที่เรียกว่า ท่อเจ็ทหรือหัวฉีด ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของกังหันพลังน้ำ (CFHT), [2]

Nilsson, H [2] ประยุกต์ใช้โปรแกรม OpenFOAM ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ ซึ่งโปรแกรม OpenFOAM นี้เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการคำนวณหาสนามการไหลแบบปั่นป่วนภายในกังหันน้ำ จากศึกษานั้นพบว่าโปรแกรม OpenFOAM มีความแม่นยำและยังสามารถเป็นตัวเชื่อมโยงกับโปรแกรมทาง CFD ตัวอื่นได้ด้วย การศึกษามี 2 กรณี ในกรณีที่ 1 ศึกษาการไหลแบบไม่คงตัวในท่อ Holleforsen การตรวจสอบผลลัพธ์ของโปรแกรม OpenFOAM และนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับทางทฤษฎี ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกัน ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ Turbine-99II ใน ธ.ค. 2005 ส่วนการศึกษาในกรณีที่ 2 ในการไหลในท่อแบบคงตัวในท่อชนิดเดียวกันก็นำมาทำการทดลองแบบเดียวกันในการหมุนวนในช่วงเวลาการคำนวณ 0.48 วินาที ผลลัพธ์จากการคำนวณทาง CFD ของโปรแกรม OpenFOAM พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรม Ansys-CFX Version 5 และ การศึกษาการไหลแบบคงตัวของ Holleforsen Runner ผลการทดลองจากการวิเคราะห์โดยใช้ Runner 1 ใบ กับใช้ runner ทั้งหมด ซึ่งจะมีผลลัพธ์เหมือนกัน ทั้งสองกรณีนี้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย หลังจากทำการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล จากการทดลองทั้งกรณี ที่หนึ่งและกรณีที่สองใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$

John, S [3] ได้กล่าวว่า ผลของการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ด้วยการออกแบบที่ทันสมัย พบว่าเป็นสิ่งสำคัญในการบอกถึงประสิทธิภาพของการออกแบบจนถึงปัจจุบัน วิธีการเชิงตัวเลขที่เหมาะสมคือการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในการคำนวณสำหรับกังหันน้ำ (Turgo) สำหรับการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม Lagrangian Mesh-Free มันสามารถบอกถึงข้อมูลและรายละเอียดของพลังงานที่ถ่ายเทออกไปและตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ไม่สามารถคำนวณได้ด้วยมือ เนื่องจากมีความซับซ้อนของการไหลแบบไม่คงตัว สำหรับการคำนวณค่าที่เล็กมาก ๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ในวงล้อของกังหันน้ำที่มีความซับซ้อนและมีการยอมรับเมื่อเทียบผลทางทฤษฎี และในวงล้อกังหันน้ำนั้นมีรูปร่างที่ยอมรับกันทางทฤษฎีเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานน้ำและตัวแปร

Garcia, E [4] จากมหาวิทยาลัย Michigan-flint ได้มีการออกแบบและได้พัฒนาระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีกำลังในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่ 200-400 วัตต์



รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 200-400 วัตต์, [4]



รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบและการทดสอบกังหันน้ำ, [4]

ผลที่ได้จากการออกแบบและทำการพัฒนากังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก หลังได้ทำการทดสอบสถานะของการทำงาน พบว่าประสิทธิภาพของการทำงานกังหันน้ำอยู่ที่ 85 เปอร์เซ็นต์ และผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 398 วัตต์



### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกังหันน้ำขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

1.3.2 เพื่อศึกษาและออกแบบโวลูตกังหันน้ำและหาตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.3 เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพและรูปแบบการไหลภายในโวลูตกังหันน้ำ

1.3.4 สร้างแบบจำลองสามมิติของกังหันน้ำเพื่อใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFD

1.3.5 สร้างต้นแบบ และศึกษาประสิทธิภาพการทำงานจริงของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเปรียบเทียบกับผลการทดลองทาง CFD

### 1.4 ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย

1.4.1 ความสูงของเสื่อน้ำมีระดับไม่ต่ำกว่า 4 เมตรน้ำ

1.4.2 ทำการศึกษาและคำนวณหาตัวแปรต่างๆที่ใช้ในโปรแกรม CFdesign V9 เพื่อจำลองการไหลภายในโวลูตของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.4.3 สร้างแบบจำลองสามมิติในส่วนของวงล้อกังหันน้ำ และโวลูตน้ำของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มุมมองต่างๆ ได้แก่ มุม 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา เพื่อใช้สำหรับการคำนวณผลทางพลศาสตร์การไหล

1.4.4 คำนวณผลทางพลศาสตร์การไหลด้วยโปรแกรม CFdesign V9 เพื่อจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในโวลูตกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กภายใต้สมมุติฐานว่าน้ำเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

1.4.5 ศึกษาผลการทดลองที่เกิดขึ้นจาก CFD และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

### 1.5 วิธีการศึกษา

การศึกษาเริ่มต้นจากการรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก แล้วจึงทำการเขียนแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น รูปทรงของตัวถังน้ำ โครงสร้างถังน้ำ ระบบท่อส่งน้ำ วงล้อกังหันน้ำ และโวลูตกังหันน้ำ เป็นต้น หลักจากนั้นจึงแยกชิ้นส่วนที่ใช้ในการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล ได้แก่ โวลูตกังหันน้ำ วงล้อกังหันน้ำ เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างเมช และลดเวลาในการคำนวณ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.5.1 ศึกษารวบรวมความรู้ที่จำเป็น โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ กลศาสตร์ของไหล การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ออกแบบและวิเคราะห์การไหลภายในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.5.2 เขียนแบบสามมิติ และระบบต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ได้แก่ ตัวถังน้ำ โครงสร้างถังน้ำ ระบบท่อส่งน้ำ วงล้อกังหันน้ำ โวลูตกังหันน้ำ และชิ้นส่วนอื่นๆ เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างโครงสร้างหลัก และองค์ประกอบการทดลองจริง

1.5.3 กำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

1.5.4 สร้างเมช กำหนดเงื่อนไขขอบเขตปัญหาในการศึกษา และคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม CFXdesign V9 เพื่อจำลองการไหลภายในโวลูตกังหันน้ำที่มุมองศาต่างๆ เพื่อหาอัตราการผลิตที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้แรงบิดและหาความเร็วรอบสูงสุด

1.5.5 ทำการสร้างต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.5.6 เปรียบเทียบผลการทดลองทาง CFD กับการทดลองจริงในการทดสอบ

1.5.7 สรุปผลการวิจัยและทำรายงานการวิจัย

## 1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.6.1 เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก และการคำนวณตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในกังหันน้ำ

1.6.2 เพื่อจะเป็นแนวทางในการพัฒนา และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในอนาคต

1.6.3 สามารถประยุกต์ความรู้ทาง CFD ใช้กับงานวิจัยด้านอื่นๆ ได้

### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกังหันน้ำขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

1.3.2 เพื่อศึกษาและออกแบบโวลูตกังหันน้ำและหาตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.3 เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพและรูปแบบการไหลภายในโวลูตกังหันน้ำ

1.3.4 สร้างแบบจำลองสามมิติของกังหันน้ำเพื่อใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFD

1.3.5 สร้างต้นแบบ และศึกษาประสิทธิภาพการทำงานจริงของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเปรียบเทียบกับผลการทดลองทาง CFD

### 1.4 ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย

1.4.1 ความสูงของเสื่อน้ำมีระดับไม่ต่ำกว่า 4 เมตรน้ำ

1.4.2 ทำการศึกษาและคำนวณหาตัวแปรต่างๆที่ใช้ในโปรแกรม CFdesign V9 เพื่อจำลองการไหลภายในโวลูตของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.4.3 สร้างแบบจำลองสามมิติในส่วนของล้อยกังหันน้ำ และโวลูตน้ำของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มุมมองต่างๆ ได้แก่ มุม 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา เพื่อใช้สำหรับการคำนวณผลทางพลศาสตร์การไหล

1.4.4 คำนวณผลทางพลศาสตร์การไหลด้วยโปรแกรม CFdesign V9 เพื่อจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในโวลูตกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กภายใต้สมมติฐานว่าน้ำเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

1.4.5 ศึกษาผลการทดลองที่เกิดขึ้นจาก CFD และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

### 1.5 วิธีการศึกษา

การศึกษาเริ่มต้นจากการรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก หลังจากนั้นทำการเขียนแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบกังหันน้ำ เช่น ถังน้ำ โครงสร้างถังน้ำ ระบบท่อส่งน้ำ วงล้อกังหันน้ำ โวลูตกังหันน้ำ เป็นต้น แยกชิ้นส่วนที่ใช้ในการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล ได้แก่ โวลูตกังหันน้ำ วงล้อกังหันน้ำ เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างเมช และลดเวลาในการคำนวณ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.5.1 ศึกษารวบรวมความรู้ที่จำเป็น โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ กลศาสตร์ของไหล การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และไฟไนต์เอลิเมนต์ภาคพลศาสตร์ของไหล เพื่อใช้ออกแบบและวิเคราะห์การไหลภายในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

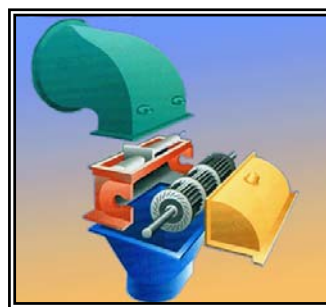
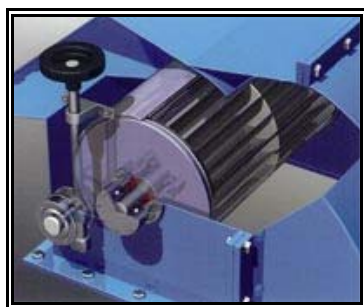
#### 2.1 กังหันน้ำ

กังหันน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาจากวงล้อน้ำซึ่งเดิมใช้สำหรับการทดน้ำและโม่แป้ง ในปี ค.ศ. 1832 วิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ เบนอยต์ ฟูเนรอนซ์ (Benoit Fourneyron) ประสบความสำเร็จในการพัฒนากังหันน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนพลังงานน้ำไปเป็นพลังงานกล โดยเรียกชื่อว่า กังหันน้ำของฟูเนรอนซ์ (Fourneyron's Turbine) หลังจากที่วงล้อน้ำไม่เคยมีการพัฒนาหรือเปลี่ยนแปลงมากกว่า 2,000 ปีก่อนหน้านี้นี้ (Boyle, 1996: 1994) จุดนี้นับเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญอย่างยิ่ง ในการพัฒนากังหันน้ำ ในปัจจุบันกังหันน้ำได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันมากมายและมีประสิทธิภาพสูง กังหันน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเพราะจะทำให้หน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ของน้ำไปเป็นพลังงานกล โดยการทำให้ใบพัดของกังหันน้ำเกิดการหมุนส่งผลให้แกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่หมุนตาม และสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ โดยทั่วไปกังหันน้ำแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทคือ

##### 2.1.1 กังหันน้ำประเภทหัวฉีด

กังหันน้ำประเภทหัวฉีด (Impulse Turbine) หรือกังหันน้ำแบบแรงกระแทก กังหันน้ำแบบนี้มักใช้กับเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำที่มีหัวน้ำสูง เพราะต้องอาศัยแรงฉีดหรือแรงกระแทกของลำน้ำที่ไหลมาจากท่อส่งน้ำที่ได้รับน้ำมาจากเขื่อน น้ำที่ได้จะไหลลงมาตามท่อส่งน้ำ จะถูกลดขนาดมายังหัวฉีด ก่อนจะถูกฉีดเข้าไปที่ตัวของกังหันน้ำ ซึ่งลำน้ำที่พุ่งผ่านหัวฉีดจะมีแรงและความเร็วสูง ดังนั้นเมื่อแรงกระแทกเข้าไปใบพัดหรือวงล้อของกังหันน้ำจะทำให้กังหันน้ำเกิดการหมุนได้ การควบคุมการหมุนของกังหันน้ำ สามารถทำได้โดยการปรับขนาดของหัวฉีด ซึ่งเสมือนเป็นการปรับปริมาณน้ำให้มากหรือน้อยได้ตามต้องการ กังหันน้ำประเภทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

2.1.1.1 กังหันน้ำแบบกิ (Banki Turbine) กังหันน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับแหล่งน้ำที่มีหัวน้ำต่ำ (low head) และต้องการกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าค่อนข้างน้อย ซึ่งปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้แล้ว กังหันน้ำชนิดนี้จะอาศัยความแรงของลำน้ำที่ออกจากหัวฉีด (Nozzle) มากระทำต่อกลีบใบของกังหันน้ำ เพื่อส่งให้เกิดการหมุนและเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของน้ำให้เป็นพลังงานกลสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า กังหันน้ำชนิดนี้จะมีส่วนประกอบหลักคือ ล้อกังหันน้ำที่ติดอยู่กับเพลาส่งกำลังซึ่งถูกรองรับด้วยแบร็ง และมีท่อเจ็ทน้ำซึ่งมีขนาดหน้าตัดของความกว้างเท่ากับหน้าตัดของวงล้อกังหันน้ำ มาประกอบเข้ากับเสื้อของวงล้อกังหันน้ำ ดังรูปที่ 2.1



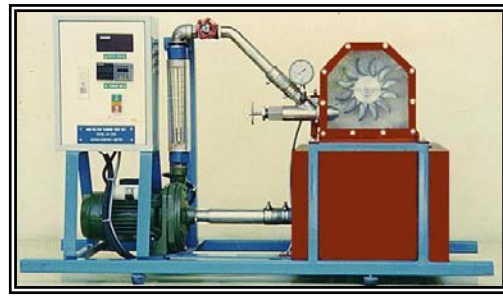
รูปที่ 2.1 ลักษณะการประกอบกังหันน้ำแบบ Banki Turbine, [5]

ลักษณะของการทำงานสำหรับกังหันน้ำแบบ Banki Turbine มีอยู่หลายชนิด ซึ่งแบ่งตามลักษณะของการติดตั้ง เช่น นำกังหันน้ำไปติดตั้งอยู่กับตึกขนาดใหญ่เพื่อนำน้ำที่กักเก็บไว้ ปล่อยลงมาตามท่อส่งน้ำผ่านหัวเจ็ทน้ำเพื่อให้กังหันน้ำหมุน สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า และนำกังหันน้ำไปติดตั้งอยู่กับน้ำตก หรือลำธารที่มีน้ำไหลอยู่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.2



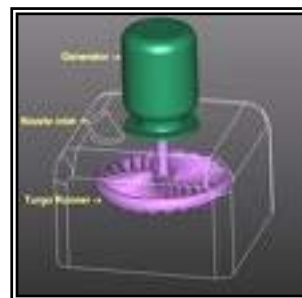
รูปที่ 2.2 ลักษณะการทำงานของ Banki Turbine, [5]

2.1.1.2 กังหันน้ำเพลตัน (Pelton Turbine) กังหันน้ำชนิดนี้ได้รับการพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880 โดย เลสเตอร์ เพลตัน (Lester Pelton) รูปแบบของกังหันน้ำนี้ ถูกออกแบบโดยใช้ถ้วยรับน้ำซึ่งติดอยู่ในวงล้อภายในตัวกังหันเป็นแบบถ้วยคู่ ดังรูปที่ 2.3 และสามารถเข้ากับลำน้ำที่ผ่านหัวฉีดมากกว่า 1 ช่อง โดยอาจมีจำนวนถึง 4 ช่องก็ได้ ซึ่งจะทำให้ได้รับกำลังเพิ่มขึ้นในขณะที่ขนาดของกังหันน้ำเท่าเดิม โดยทั่วไปกังหันน้ำนี้เหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งน้ำที่มีระดับของหัวน้ำสูง (High Head) ซึ่งสูงกว่า 250 เมตร หรืออาจน้อยกว่าก็ได้ในกรณีที่เป็นระบบเล็ก การทำให้กังหันน้ำชนิดนี้หมุนอาจใช้ความเร็วของลำน้ำที่ผ่านหัวฉีดที่ไม่ต้องมีความเร็วสูงนัก โดยประสิทธิภาพของกังหันน้ำชนิดนี้จะดีที่สุด เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการหมุนของวงล้อถ้วยเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วของลำน้ำที่ฉีดเข้าไป (Boyle. 1996 : 205-206)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของกังหันน้ำเพลตัน, [5]

2.1.1.3 กังหันน้ำเทอร์โก (Turgo Turbine) เป็นกังหันน้ำที่ถูกพัฒนาขึ้นจากกังหันน้ำแบบเพลตัน เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1920 โดยภายในตัวกังหันน้ำนี้จะใช้ถ้วยรับน้ำแบบเดี่ยวและค่อนข้างตั้งแทนถ้วยรับน้ำแบบคู่ในกังหันน้ำแบบเพลตัน ดังรูปที่ 2.4 กังหันน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับแหล่งน้ำที่มีหัวน้ำที่มีระดับความสูงปานกลาง (Medium Head) เพราะสามารถใช้กับลำน้ำที่ผ่านหัวฉีดซึ่งมีความเร็วไม่มากนักและมีความสามารถในการรับปริมาณน้ำได้มากกว่ากังหันน้ำเพลตันโดยประสิทธิภาพของกังหันน้ำจะดีที่สุด เมื่อความเร็วของการหมุนของวงล้อถ้วยเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วของลำน้ำ ที่ฉีดเข้าไปเหมือนกับกรณีของกังหันน้ำแบบเพลตัน (Boyle. 1996 : 207)

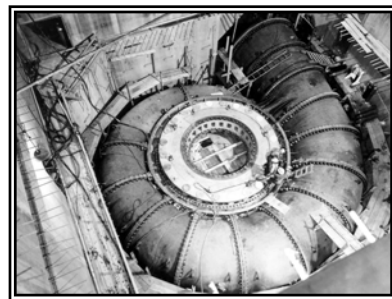


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างใบกังหันน้ำเทอร์โก, [5]

## 2.1.2 กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยา

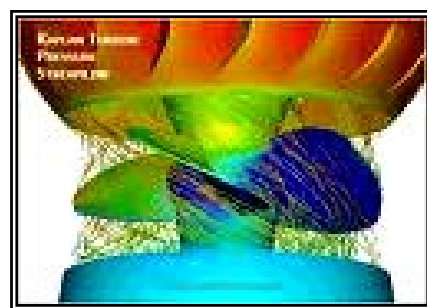
กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยา (Reaction Turbine) เป็นกังหันน้ำที่ต้องอาศัยแรงดันของน้ำซึ่งเกิดจากความแตกต่างของระดับน้ำที่อยู่ด้านหน้า และด้านหลังของกังหันน้ำ มาทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุน น้ำที่เข้าไปในตัวกังหันจะแทรกเข้าไปในช่องระหว่างใบพัดเต็ม ทุกช่องพร้อมกัน ทำให้ตัวกังหันน้ำทั้งหมดจะจมอยู่ในน้ำ กังหันน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับการใช้กับแหล่งน้ำที่มีหัวน้ำต่ำถึงปานกลาง โดยทั่วไปที่นิยมใช้จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

2.1.2.1 กังหันน้ำฟรานซิส (Francis Turbine) กังหันน้ำชนิดนี้เป็นกังหันน้ำที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะสามารถใช้กับแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของหัวน้ำตั้งแต่ 2 ถึงกว่า 300 เมตร



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกังหันน้ำฟรานซิส, [5]

2.1.2.2 กังหันน้ำเคปแลน (Kaplan Turbine) เป็นกังหันน้ำที่มีลักษณะเหมือนใบพัดดังรูปที่ 2.5 เหมาะกับแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของหัวน้ำต่ำตั้งแต่ 1 ถึง 70 เมตร (วัฒนา ถาวร. 2543: 43) และมีหลักการทำงานโดยให้น้ำจะไหลผ่านใบพัดในทิศทางขนานกับแกนของกังหันน้ำ โดยใบพัดของกังหันน้ำเคปแลนสามารถปรับมุมเพื่อรับแรงอัดหรือแรงเฉือนของน้ำโดยอัตโนมัติซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนของกังหันน้ำได้



(ก) ลักษณะโครงสร้างกังหันน้ำเคปแลน

(ข) การวิเคราะห์กังหันน้ำเคปแลนด้วย CFD

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกังหันน้ำเคปแลน, [5]

2.1.2.3 กังหันน้ำเดเรียซ (Deriaz Turbine) เป็นกังหันน้ำที่มีลักษณะทั่วไปคล้ายกับกังหันน้ำ เคนแต่แตกต่างกันในส่วนของคุณลักษณะของใบพัด ซึ่งคล้ายกับใบพัดของกังหันน้ำฟรานซิส กังหันน้ำชนิดนี้จะใช้แรงดันน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำในทิศทางทแยงมุม กับแกนอ้างอิงของ กังหันน้ำ และการประยุกต์ใช้จะเหมาะกับแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของหัวน้ำสูงๆ เพราะต้องใช้แรงดันน้ำที่มีแรงดันสูง ลักษณะของกังหันน้ำแบบเดเรียซแสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกังหันน้ำเดเรียซ, [6]

### 2.1.3 ความสูงของหัวน้ำสำหรับกังหันน้ำแต่ละชนิด

กังหันน้ำแต่ละชนิดจะมีขอบเขตและหลักการทำงานต่างกัน พลังงานและประสิทธิภาพการทำงานที่ได้จากกังหันน้ำจะแปรผันกับความสูงของหัวน้ำเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสูงของหัวน้ำและประสิทธิภาพการทำงาน

ชนิดของกังหันน้ำ	ความสูงของหัวน้ำ (เมตร)	ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด
Banki Turbine	4-6 เมตร	50- 85 %
Francis Turbine	15-450 เมตร	90 %
Turgo Turbine	50-150 เมตร	95 %
Pelton Turbine	150 เมตร	87 %
Kaplan Turbine	1-70 เมตร	90 %

## 2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรง หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)



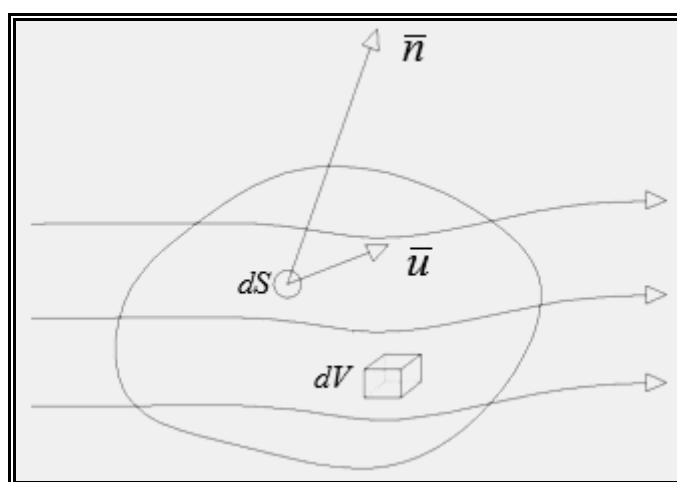
เหล่านี้จะได้มาจากหลักทางกายภาพ 3 หลักด้วยกันคือ กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) และสมการบังคับที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) ระเบียบวิธีจำกัดมูลฐาน (Finite Element) และระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume) เป็นต้น

สำหรับการวิเคราะห์การไหลในกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเกิดการไหล ดังนั้นจึงใช้เพียงกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงขอเน้นเฉพาะกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเท่านั้น

### 2.2.1 กฎอนุรักษ์มวล

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมของไหลต่อเนื่องในสนามการไหลดังรูปที่ 2.8 การส่งถ่ายมวลเข้าออกปริมาตรควบคุม จะเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์มวลคือ

อัตราเปลี่ยนแปลงมวลภายใน ปริมาตรควบคุม	$=$	อัตราการไหลสุทธิของมวลที่ ไหลผ่านผิวควบคุม
---	-----	---



รูปที่ 2.8 ปริมาตรควบคุม, [8]

สามารถเขียนในรูปสมการ คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.1)$$

สมการ ( 2.1) มีชื่อเรียกว่าสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) เมื่อพิจารณาการไหลในกึ่งห้วงน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า ให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) พบว่าความหนาแน่นของน้ำคงที่ จะได้สมการต่อเนื่องเป็น

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

### 2.2.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันและเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมจะได้ว่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมปริมาตรควบคุม = แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม

อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมของปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมกับโมเมนตัมสุทธิที่ไหลผ่านผิวควบคุม ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) \quad (2.3)$$

แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดแรกเป็นแรงเนื่องจากสนามดึงดูด (Field Force) ซึ่งได้แก่ แรงโน้มถ่วงโลก (Body Force) และแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดที่สองเป็นแรงที่กระทำที่ผิว (Surface Force) ซึ่งแบ่งออกเป็นแรงในแนวตั้งฉากได้แก่ ความดัน ความเค้นอัดหรือดึง แรงในแนวนอนกับผิว ได้แก่ ความเค้นเฉือน ดังสมการ

$$\iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (2.4)$$

ดังนั้นสมการโมเมนตัม คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) = \iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (2.5)$$

ใช้ทฤษฎีของเกาส์ช่วยในการเปลี่ยนรูปสมการดังนี้

$$\oint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\vec{S}) = \iiint_V \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) dV$$

$$\oint_S \bar{\sigma} d\vec{S} = \iiint_V \nabla \cdot \bar{\sigma} dV$$

จะได้สมการโมเมนตัมในรูปสมการอนุพันธ์เชิงขั้วดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{u} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \bar{\sigma} \quad (2.6)$$

เรียกสมการ (2.6) ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) และสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปเทนเซอร์ (Tensor) ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (2.7)$$

พิจารณาแยกเทอม  $\rho u_j u_k$  เป็น  $\rho u_k$  และ  $u_j$  แล้วจัดรูปสมการอนุพันธ์เชิงขั้วใหม่จะได้

$$p \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i$$

ใช้สมการความต่อเนื่องเพื่อกำจัดเทอมที่สองและสาม จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ ดังนี้

$$p \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i \quad (2.8)$$

โดย

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (2.9)$$

สำหรับของไหลแบบนิวตัน (Newtonian Fluid) ซึ่งความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไหล ได้เทนเซอร์ความเค้นเฉือน (Shear Stress Tensor) คือ

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.10)$$

แทนค่าความเค้นเฉือนในสมการที่ (2.10) ลงในสมการ(2.9) ได้เทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor) คือ

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute or Dynamic Viscosity Coefficient)

$\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second Viscosity Coefficient)

$\delta_{ij}$  คือ Kronecker Delta (มีค่าเป็น 1 เมื่อ  $i = j$  และมีค่าเป็น 0 เมื่อ  $i \neq j$ )

สโตกส์ (Stokes) ตั้งสมมุติฐานความสัมพันธ์ระหว่าง  $\mu$  และ  $\lambda$  ไว้ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (2.12)$$

แทนค่าแทนเซอร์ความเค้นในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ที่สมบูรณ์ คือ

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho f_j \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาการไหลในกังหันน้ำให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ทำให้เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการ(2.13)มีค่าเป็นศูนย์และเทอมที่สามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น

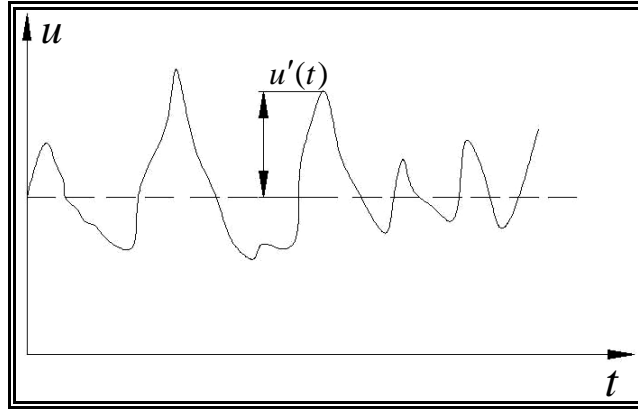
$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \mu \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \right] = \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i}$$

จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับกรณีไหลแบบอัดตัวไม่ได้และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + \rho f_j \quad (2.14)$$

### 2.2.3 การไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วน ค่าของตัวแปรต่างๆมีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็ว เป็นต้น ดังรูปที่ 2.9 แสดงค่าของความเร็ว  $u$  ในการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณค่าตัวแปร เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายจึงสมมุติให้คุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนปริมาณเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น  $\bar{u}$   $\bar{v}$  หรือ  $\bar{p}$  กับส่วนที่กระเพื่อม (Fluctuation) เช่น  $u'$   $v'$  หรือ  $p'$



รูปที่ 2.9 ค่าความเร็ว  $u$  ในการไหลแบบปั่นป่วน, [8]

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่ง ทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) เข้ามาช่วย เพื่อทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาแบบปิด (Close Problem) ให้สามารถหาผลเฉลยได้

สมการบังคับของการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ มีอุณหภูมิคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ประกอบด้วย

#### 2.2.3.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.15)$$

#### 2.2.3.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.16)$$

จากการสมมุติให้ตัวแปรต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม ตัวอย่างเช่น ตัวแปรใดๆ  $\phi$  แบ่งออกเป็น

$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-Averaging) จะได้

$$\phi(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi(x, t) dt$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ค่าเฉลี่ยในส่วนของการกระเพื่อมมีค่าเป็นศูนย์  $\overline{\phi'} = 0$  และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรเป็น  $(\overline{\phi\beta} = \overline{\phi\beta} + \overline{\phi'\beta'})$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม แล้วทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง จะได้สมการบังคับเป็น

2.2.3.3 สมการความต่อเนื่องสำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (2.17)$$

2.3.3.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\frac{\partial \rho \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.18)$$

สมการ (2.17) และ (2.18) เรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการที่ได้ี้จะมีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ เพียงแต่มีเทอมของ ค่าความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds Stress)  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$  เพิ่มขึ้นมาในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง เทอมความเค้นของเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นมานี้เป็นผลทำให้จำนวนตัวแปรมีมากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ ทำให้ไม่สามารถแก้สมการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อทำให้ปัญหาเป็นแบบปิด ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ต่อไป

## 2.2.4 แบบจำลองความปั่นป่วน

การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (RANS) ต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ โดยใช้หาค่าความเค้นของเรย์โนลด์ ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าของความกระเพื่อม แต่จะสนใจเฉพาะส่วนของค่าเฉลี่ยเท่านั้น สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น จึงจะสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ ใช้ระยะเวลาและหน่วยความจำน้อยที่สุด ตัวอย่างแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันมีหลายแบบ เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  แบบจำลองความปั่นป่วน RAG  $k-\varepsilon$  แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\omega$  แบบจำลองความปั่นป่วน The Shear-Stress Transport (SST)  $k-\omega$  แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) เป็นต้น และในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองที่นำมาใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือ แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$

### 2.2.4.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ [7]

เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้กันแพร่หลาย เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดย Launder and Spalding ซึ่งจะใช้สมมุติฐานของบูสซิเนส (Boussinesq Hypothesis) เพื่อประมาณ

ค่าความเค้นของเรย์โนลด์ส์ ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $k$  คือพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.20)$$

$\mu_t$  คือค่าความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent Eddy Viscosity)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.21)$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (Turbulent Dissipation Rate)

$C_\mu$  คือ ค่าคงที่

รูปแบบสมการที่ใช้สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \varepsilon$  มีดังนี้

2.2.4.1.1 สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.22)$$

2.1.4.1.2 สมการของอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  คือ Prandtl Number ของการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$  ตามลำดับ

$G_k$  คือเทอมการสร้างความปั่นป่วน (Turbulent Production)

$$G_k = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.24)$$

เมื่อประยุกต์ใช้สมมติฐานของบอยสซิเนสจะได้ว่า

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.25)$$

เมื่อ  $S$  คือ เทนเซอร์ความเครียด (Train Tensor) หาได้จาก

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (2.26)$$

และ  $S_{ij}$  คืออัตราความเครียดเฉลี่ย (Mean Strain Rate) โดย

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.27)$$

สำหรับค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  ซึ่งได้มาจากการทดลองต่างๆ ได้แก่  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

### 2.2.5 พลศาสตร์ของไหลภาคการคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

หลักการวิเคราะห์การไหลด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล คือการวิเคราะห์หรือทำนายผลของปัญหาการไหลเพื่อหาค่าต่างๆ เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ ของของไหลด้วยวิธีการทางตัวเลข เพื่อแก้สมการ 3D-Navier-Stokes

ในขั้นตอนการแก้สมการ 3D-Navier-Stokes นั้น โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

2.2.5.1 Pre-Processor ขั้นตอนเริ่มต้น ในการจำลองรูปแบบการไหลโดยใช้ CFD ซึ่งจะเป็นการกำหนดข้อมูลต่างๆ เพื่อที่จะนำไปใช้ในขั้นตอน Processor ต่อไป ซึ่งข้อมูลที่สำคัญได้แก่

- กำหนดขอบเขตของพื้นที่ที่จะทำการพิจารณา (Computational Domain)
- การสร้างเมช โดยทำการกำหนดเมชให้เหมาะสมกับชนิดและรูปร่างของพื้นที่การไหลนั้นๆ เพื่อความเหมาะสม สำหรับให้ได้ผลของคำตอบที่ถูกต้องตามปัญหาขอบเขตที่เกิดขึ้น
- กำหนด Boundary Condition และสถานะเริ่มต้น (Initial Condition)
- กำหนดคุณสมบัติของของไหล
- กำหนดลักษณะการไหล

ผลคำตอบที่ได้จากการคำนวณได้แก่ ความเร็วในทิศทางต่างๆ , ความดัน , อุณหภูมิ ฯลฯ จะเป็นค่าที่ตำแหน่ง (Node) ต่างๆ ใน Computational Domain ซึ่งจะมีความถูกต้องมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนเมชที่ทำการแบ่ง ถ้ามีความละเอียดมาก ผลคำตอบที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น

2.2.5.2 Processor เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่งของ CFD โดยทั่วไปขั้นตอนดังกล่าวนี้จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอน Pre-Processor มาแก้สมการโดยใช้วิธีการทางตัวเลข

2.2.5.3 Post-Processor เป็นขั้นตอนของการประมวลผลของคำตอบที่ได้จากกระบวนการ Processor ซึ่งโดยทั่วไปจะแสดงอยู่ในรูป

- Velocity Vector Plot
- Stream Line และ Contour Plot

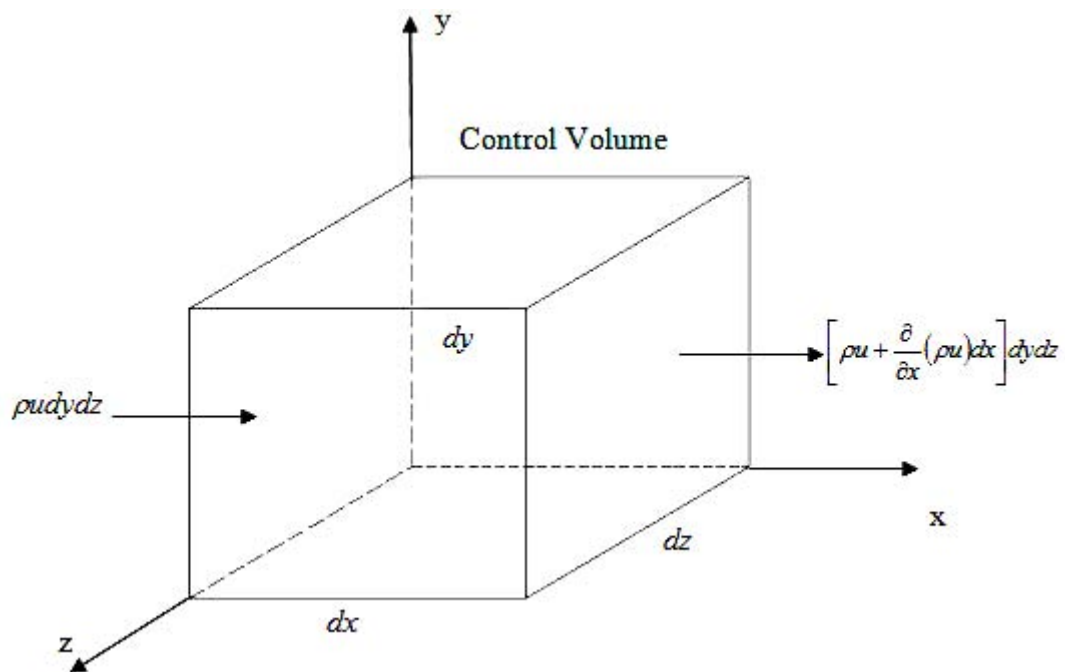


ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้เรามองเห็นพฤติกรรมของของไหลบริเวณต่างๆ และทราบค่าได้ว่าที่บริเวณใดในพื้นที่การคำนวณมีค่าของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ เป็นอย่างไร

#### 2.3.5.4 สมการ Navier-Stokes ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวไม่ได้

ในการวิเคราะห์การไหลโดยทั่วไปจะพิจารณาจาก Element ที่มีขนาดเล็กๆ โดยการหาค่าคุณสมบัติของตัวแปรต่างๆ จะอาศัยการหาตามแนวคิดของ Navier-Stokes ซึ่งมีวิธีดังต่อไปนี้

การหาสมการ Mass Conservation



รูปที่ 2.10 Element ของปริมาตรควบคุมที่ในคาร์ทีเซียน โคออร์ดิเนต, [8]

เมื่อพิจารณา Element ที่มีขนาดเป็น  $dx$ ,  $dy$  และ  $dz$  ตามลำดับดังรูปที่ 2.10 ซึ่งให้การไหลแต่ละด้านเป็นการไหลแบบ 1 มิติ จะได้สมการตามกฎการอนุรักษ์มวลคือ

$$\int_{cv} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{out} - \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{in} = 0 \quad (2.28)$$

เมื่อ  $dx$ ,  $dy$  และ  $dz$  มีขนาดเข้าใกล้ 0 หรือมีขนาดเล็กมากๆ สามารถลดรูปของ  $\int_{cv} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$  ให้อยู่ในรูปเป็น ดิฟเฟอเรนเชียลเทอม คือ

$$\int_{cv} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \approx \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (2.29)$$

เมื่อพิจารณาในแนวแกน x

$$\text{จะได้ค่า } \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{out} \text{ มีค่าเท่ากับ } \left[ \rho u + \frac{\partial \rho u}{\partial x} dx \right] dy dz$$

$$\text{และค่า } \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{in} \text{ มีค่าเท่ากับ } \rho u dy dz$$

ในทำนองเดียวกันจะได้สมการตามกฎการอนุรักษ์มวลแนวแกนที่เหลือดังนี้  
ในแนวแกน y

$$\text{จะได้ค่า } \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{out} \text{ มีค่าเท่ากับ } \left[ \rho v + \frac{\partial \rho v}{\partial y} dy \right] dx dz$$

$$\text{และค่า } \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{in} \text{ มีค่าเท่ากับ } \rho v dx dz$$

ในแนวแกน z

$$\text{จะได้ค่า } \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{out} \text{ มีค่าเท่ากับ } \left[ \rho w + \frac{\partial \rho w}{\partial z} dz \right] dx dy$$

$$\text{และค่า } \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{in} \text{ มีค่าเท่ากับ } \rho w dx dy$$

แทนค่าในสมการตั้งต้นได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} dx dy dz = 0 \quad (2.30)$$

นำ  $dx dy dz$  หารตลอดสมการได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.31)$$

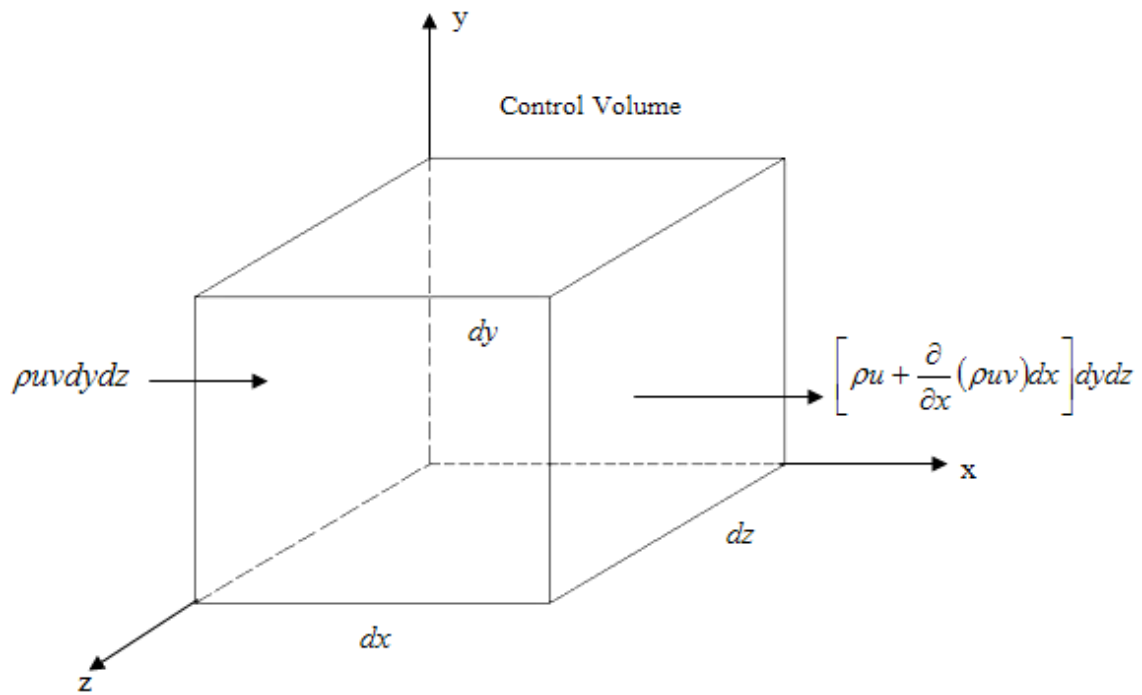
พิจารณาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้จะได้สมการ

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.32)$$

#### 2.2.5.5 การหาสมการ โมเมนตัม

ทำการพิจารณา Element ที่มีขนาดเป็น  $dx, dy$  และ  $dz$  ตามลำดับและมีค่าความเค้นที่กระทำต่อ Element ในแนวแกนต่างๆ ดังรูปที่ 2.11 จากรูปสามารถทำการหาค่าโมเมนตัมเชิงเส้นได้จากสมการ

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{cv} \vec{V} \rho dV \right) + \sum \left( m_i \vec{V}_i \right)_{out} - \sum \left( m \vec{V}_i \right)_{in} \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.11 Element ของปริมาตรควบคุมคงที่ในคาร์ทีเซียนออร์ดิเนต, [8]

เนื่องจาก Element มีขนาดเล็กมาก รูปแบบของการอินทิกรัล (Integral) สามารถลดรูปเป็นแบบเดริเวทีฟ (Derivative)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{cv} \vec{V} \rho dV \right) \approx \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) dx dy dz \quad (2.34)$$

ฟลักซ์ (Flux) ของโมเมนตัมจะเกิดขึ้นที่ผิวทั้ง 6 ด้าน โดยกำหนดให้มีด้านเข้า 3 ด้าน และด้านออก 3 ด้าน สามารถเขียนตารางแสดงสมการโมเมนตัมดังนี้

ตารางที่ 2.2 ฟลักซ์ (Flux) ของโมเมนตัมจะเกิดขึ้นที่ผิวทั้ง 6 ด้าน

Face	Inlet Momentum Flux	Outlet Momentum Flux
x	$\rho u \vec{V} dy dz$	$\left( \rho u \vec{V} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \vec{V}) dx \right) dy dz$
y	$\rho v \vec{V} dx dz$	$\left( \rho v \vec{V} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \vec{V}) dy \right) dx dz$
z	$\rho w \vec{V} dx dy$	$\left( \rho w \vec{V} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \vec{V}) dz \right) dx dy$

แทนค่าสมการที่ (2.34) และสมการ Flux เข้าไปในสมการที่ (2.33) ได้สมการดังนี้

$$\sum \vec{F} = dxdydz \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \vec{V}) \right] \quad (2.35)$$

จากความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ สามารถจัดรูปให้ง่ายลงได้โดยการแยกเทอมในวงเล็บได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \vec{V}) = \\ \vec{V} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} \right] + \rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.36)$$

แต่เนื่องจากการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ( $\rho = \text{ค่าคงที่}$ )

$$\vec{V} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} \right] = 0 \quad (2.37)$$

และ

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (2.38)$$

แทนค่าสมการที่ (2.37), (2.38) ลงในสมการที่ (2.36) จะได้

$$\sum \vec{F} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt} dxdydz \quad (2.39)$$

จากสมการที่ (2.39) พิจารณาแรงสุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมที่มีอยู่ 2 ชนิดคือ Surface Force และ Body Force

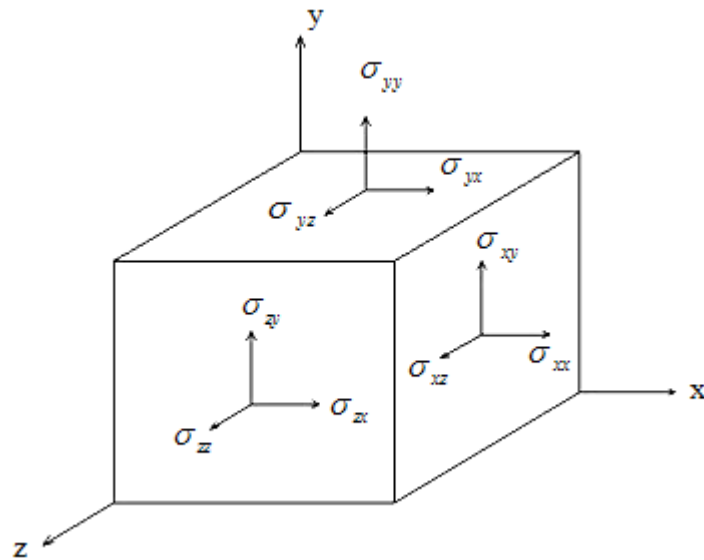
Surface Force คือแรงที่เกิดผลของความเค้นที่กระทำบนผิวของ Element โดยค่าความเค้นเกิดจากผลรวมของความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic) และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากความหนืด (Viscous Stresses) เพราะเกิดจากการเคลื่อนที่ด้วย Velocity Gradients

Body Force คือแรงที่เกิดจากสภาวะภายนอกที่กระทำต่อ Element ในการทำงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลที่มาจากกระทำของแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งค่าความเร่ง Coriolis และค่าความเร่ง Centripetal เท่านั้น

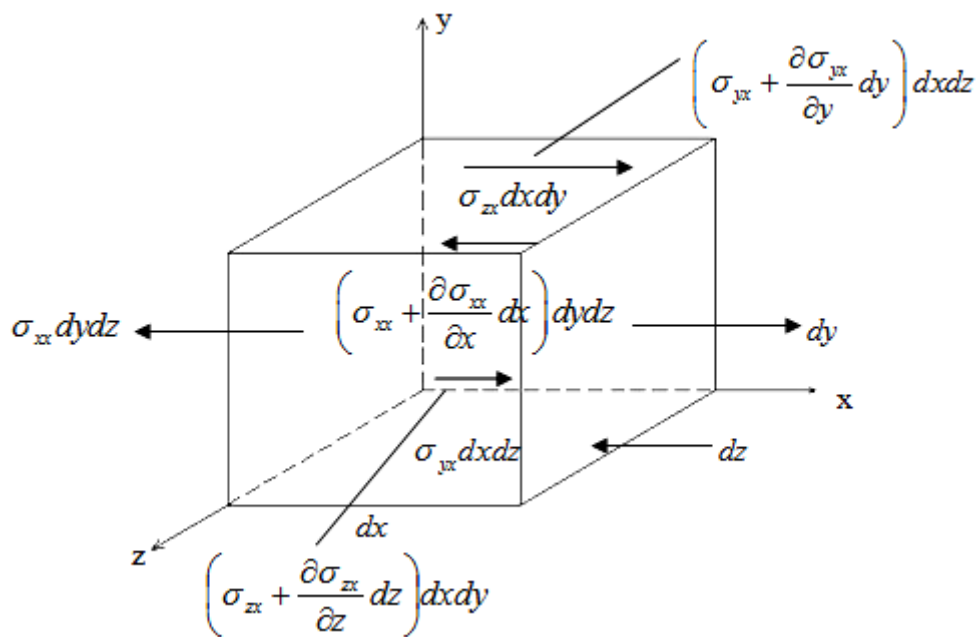
พิจารณาผลที่มาจาก Surface Force และ Body Force ที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P + \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & -P + \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & -P + \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

สมการที่ (2.40) ได้จากการวิเคราะห์ผลจากความเค้นในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความเค้นที่กระทำต่อ Element, [8]



รูปที่ 2.13 Element ของปริมาตรควบคุมที่โดยแสดง Surface Force ในแนวแกน x, [8]

จากรูปที่ 2.13 ในแนวแกน x ที่ผิวหน้าทางด้านซ้ายแรงที่มีขนาด  $\sigma_{xx} dydz$  จะสมดุลกัน แรงที่กระทำทางด้านขวาคือ แรงที่มีขนาด  $\sigma_{xx} dydz$  แรงสุทธิจึงมีค่าเท่ากับ  $\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx dy dz$  บนผิวอื่นๆ ก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นแรงสุทธิในแนวแกน x คือ

$$dF_{x,surf} = \left[ \frac{\partial(\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_{zx})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.41) จะเห็นได้ว่า สมการที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน ชุดตัวแปรในแถวแรกของสมการที่ (2.40) สามารถเขียนสมการขึ้นมาใหม่ได้ว่า

$$\frac{dF_{x,surf}}{dV} = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} \quad (2.42)$$

เมื่อพิจารณาในแนวแกน y จะได้

$$\frac{dF_{y,surf}}{dV} = \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} \quad (2.43)$$

เมื่อพิจารณาในแนวแกน z จะได้

$$\frac{dF_{z,surf}}{dV} = \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} \quad (2.44)$$

คูณสมการที่ (2.42), (2.43), (2.44) ด้วย  $i, j$ , และ  $k$  ตามลำดับ จะได้สมการแรงรวมบนผิวหน้าในรูปเวกเตอร์ ดังนี้

$$\left( \frac{d\vec{F}}{dV} \right)_{surf} = -\nabla \rho + \left( \frac{d\vec{F}}{dV} \right)_{viscous} \quad (2.45)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \left( \frac{d\vec{F}}{dV} \right)_{viscous} &= \vec{i} \left( \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} \right) \\ &\quad + \vec{j} \left( \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} \right) \\ &\quad + \vec{k} \left( \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.46)$$

จัดใหม่ให้อยู่ในรูปไดเวอร์เจนซ์ (Divergence) ใหม่จะได้

$$\left( \frac{d\vec{F}}{dV} \right)_{viscous} = \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2.47)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.45) แทนในสมการที่ (2.39) จะได้

$$\rho \vec{g} - \nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (2.48)$$

หรือมีสมการเต็มรูปแบบดังนี้

$$\rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.49)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.50)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} = \rho \left( \frac{\partial w}{\partial x} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.51)$$

จากคุณสมบัติของ Newtonian Fluid จะได้

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

เมื่อ  $\mu$  คือ Viscosity Coefficient

แทนค่าลงในสมการที่ (2.49), (2.50), (2.51) ได้สมการดังนี้

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.52)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.53)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.54)$$

จัดให้อยู่ในรูปไดเวอร์เจนซ์ (Divergence) ได้

$$\rho \vec{g} - \nabla P + \mu (\nabla^2 \cdot \vec{v}) = \rho \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (2.55)$$

เมื่อของไหลเกิดการหมุนรอบแกนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\Omega$  จะมีผลทำให้เกิดความเร่ง Coriolis และ ความเร่ง Centripetal กระทำต่อของไหลเกิดเป็น Body Force ขึ้นจาก [3]

$$f_i = f_{\text{Coriolis}} + f_{\text{Centripetal}} \quad (2.56)$$

$$f_{\text{Coriolis}} = -2\rho\omega \times V \quad (2.57)$$

$$f_{\text{Centripetal}} = -\rho\omega \times (\omega \times r) \quad (2.58)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.57), (2.58) ไปรวมกับสมการที่ (2.55) จะได้

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} + \nabla P = \rho \vec{g} + \mu (\nabla^2 \cdot \vec{V}) - 2\rho\omega \times \vec{V} - \rho\omega \times (\omega \times r) \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.59) เป็นสมการควบคุมการไหลแบบของไหลอัดตัวไม่ได้ที่หมุนรอบแกน

## 2.3 วิธีการหาประสิทธิภาพรวมและการสูญเสีย

### 2.3.1 วิธีการหาประสิทธิภาพรวม

การหาประสิทธิภาพรวม  $\eta_{\text{total}}$  จะหาจากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า  $p_e$  และกำลังน้ำที่ให้แก่กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า  $p_i$  ดังแสดงในสมการที่ (2.60) [9]

$$\eta_{\text{total}} = \frac{p_e}{p_i} \quad (2.60)$$

โดยที่  $p_e (kw)$  ได้จากการวัด  $p_i (kw)$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.61) ดังนี้

$$p_i = gQh_w \quad (2.61)$$

โดยที่  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

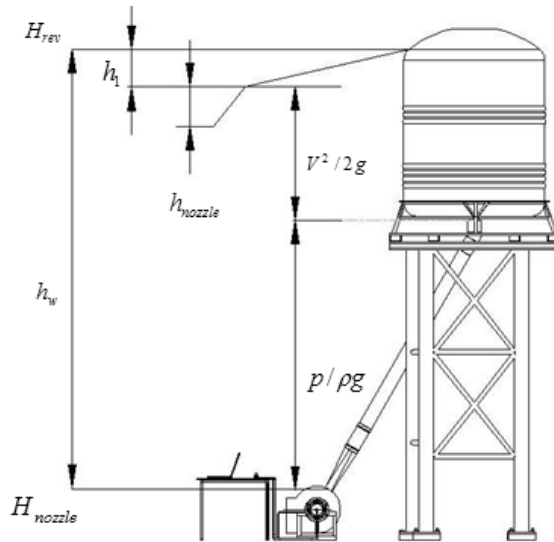
$Q$  คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า

$h_w$  คือ เสดที่ออกแบบในการคำนวณหา กำลังติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า

ในการหาอัตราการไหลของน้ำ  $Q$  ที่ใช้ในการผลิต ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาจากการวัดความเร็วของกระแสน้ำและพื้นที่หน้าตัดของท่อเจ็ทน้ำ ( $m^3/s$ ) [9]

การหาเสด  $h_w$  ได้จากความแตกต่างของระดับน้ำในถังน้ำเทียบกับระดับของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดตาม แสดงในรูปที่ 2.14





รูปที่ 2.14 เส้นเสดก้งหันน้ำผลิตไฟฟ้า

### 2.3.2 การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน (Head Loss Due to Friction)

การสูญเสียพลังงาน เนื่องจากความเสียดทานหรือเรียกว่าการสูญเสียหลัก สำหรับการไหลของของไหลในภาชนะปิด พบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวท่อ ความเร็ว (Velocity Head) และเป็นส่วนกลับกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานนี้มีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์เกี่ยวกับสมการของการไหลมาก จากสมการพลังงานทั่วไปของสมการเบอร์นูลลี

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (2.62)$$

ค่า  $h_f$  หรือ  $h_L$  คือค่าการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$h_f = f \frac{Lv^2}{2gD} \quad (2.63)$$

เมื่อ  $h_f$  คือ พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (เมตร)

$f$  คือ แฟกเตอร์ของความเสียดทาน

$L$  คือ ความยาวท่อ (เมตร)

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)

$v$  คือ ความเร็วของการไหล (เมตร/วินาที)

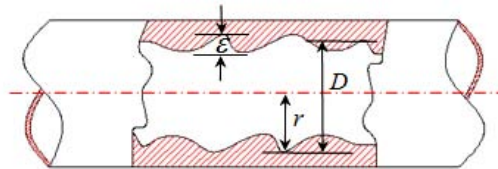
$g$  คือ อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที<sup>2</sup>)

$\frac{v^2}{2g}$  คือ เสดความเร็ว (เมตร)

ในการคำนวณค่า  $h_f$  จะต้องทราบก่อนว่าเป็นการไหลแบบใด เพราะจะสัมพันธ์กับการหาค่า  $f$  ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบจะหาค่าได้จากสมการ

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (2.64)$$

ถ้าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ค่า  $f$  จะขึ้นอยู่กับ  $N_R$  และค่าความขรุขระของผิวท่อต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความขรุขระของผนังท่อ

เมื่อ  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ  $\varepsilon$  คือค่าความขรุขระ และค่าความขรุขระของผิวท่อ  $\varepsilon$  หาได้จากตารางที่ 2.3 ซึ่งจะบอกชนิดของท่อและความขรุขระที่ใช้ (หน่วยเป็น มิลลิเมตร และ ฟุต) จากตารางนำมาหาค่า  $\frac{\varepsilon}{D}$

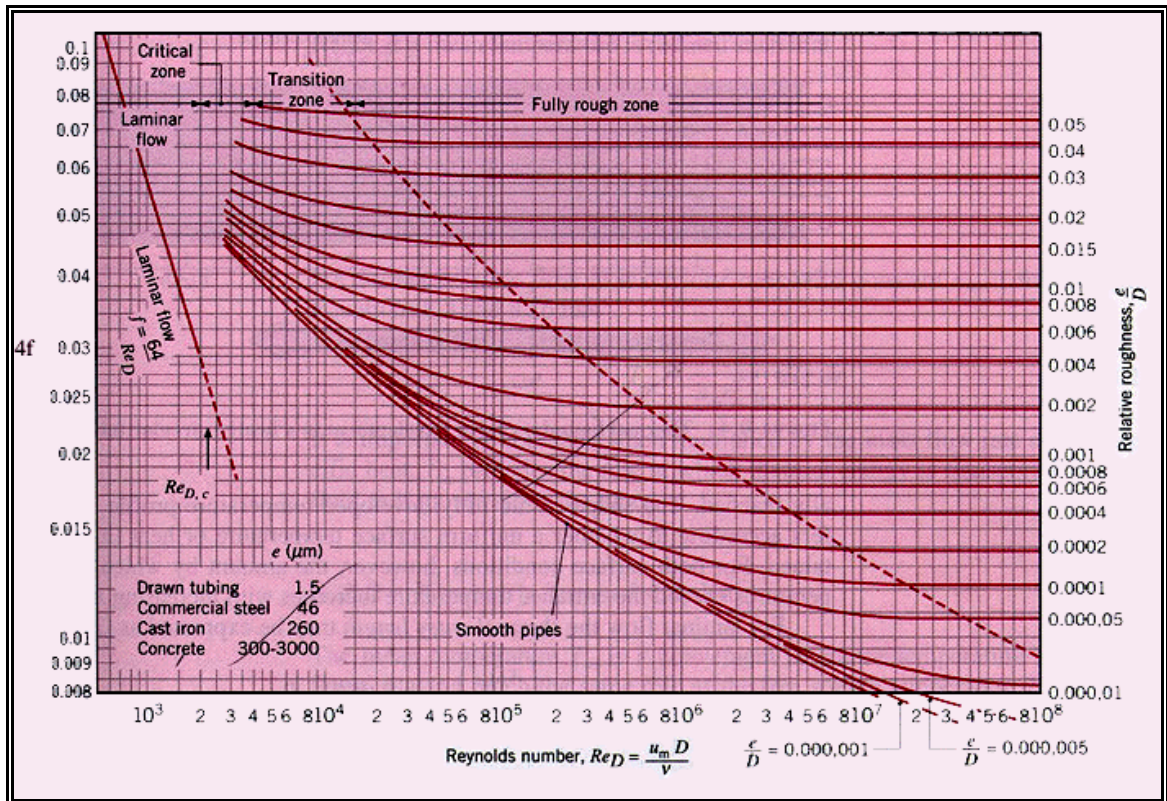
ตารางที่ 2.3 ค่าความขรุขระภายในผิวท่อสำหรับท่อใหม่

ชนิดของท่อ	Roughness ( $\varepsilon$ )	
	ft	mm
ท่อพลาสติก ท่อพีวีซี ท่อแก้ว	0.000005	0.0015
ท่อเหล็กกล้าหรือท่อเหล็กเหนียวที่ขายในท้องตลาด	0.00015	0.046
ท่อเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.00015	0.046
ท่อเหล็กหล่อที่เคลือบหรือฉาบด้วยยางมะตอย	0.0004	0.12
ท่อเหล็กอาบสังกะสี	0.00085	0.15
ท่อเหล็กหล่อ	0.0006 - 0.003	0.25
ท่อไม้	0.0006 - 0.003	0.18 - 0.9
ท่อคอนกรีต	0.001 - 0.01	0.3 - 3
ท่อเหล็กกล้าที่ยืดด้วยหมุด	0.003 - 0.03	0.9 - 9

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_R$  กับ  $\frac{\varepsilon}{D}$  หาค่า  $f$  โดยใช้ Moody Diagram ตามรูปที่ 2.16 จะได้ค่า  $f$  ออกมา

ในกรณีที่ท่อมีผิวเรียบมาก เช่น หลอดแก้ว หรือท่อพลาสติกจะหาค่า  $f$  ได้จากสมการ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \left[ \frac{N_R \sqrt{f}}{251} \right] \quad (2.65)$$



รูปที่ 2.16 มูดี้ไดอะแกรม (Moody Diagram), [19]

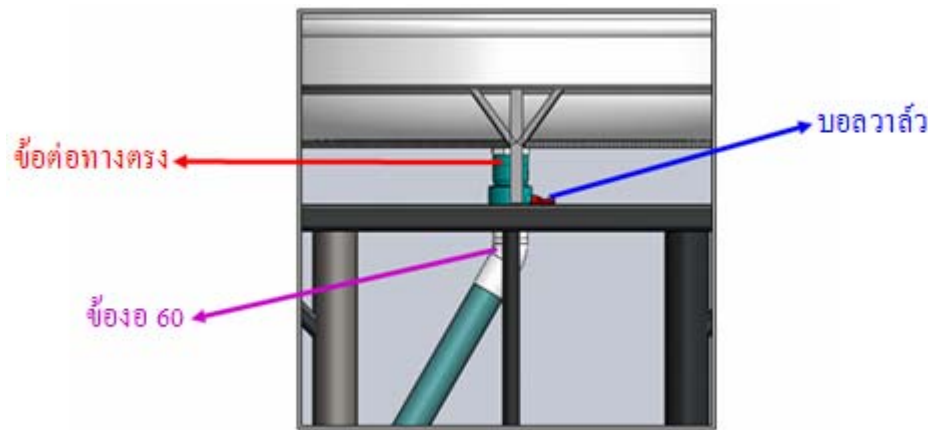
### 2.3.3 การคำนวณหาการสูญเสียรอง (Determination of Minor Head Losses)

ค่าพลังงานสูญเสียรอง ( $h_m$ ) คือ การสูญเสียพลังงานจากการที่ของไหลไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อเข้ากับท่อ เช่น ข้องอ ข้อโค้ง ข้อลด ข้อเพิ่ม วาล์วควบคุมการไหล เป็นต้น สามารถคำนวณหาได้ในเทอมของเสดความเร็ว (Velocity Head) ดังสมการ

$$h_m = k \frac{v^2}{2g} \quad (2.66)$$

- เมื่อ  $h_m$  คือ Minor Head Loss  
 $k$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง  
 $v$  คือ ความเร็วในการไหล (เมตร/วินาที)  
 $g$  คือ อัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที<sup>2</sup>)

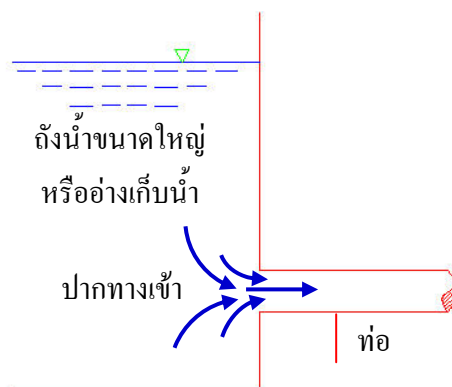
ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย  $k$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของการต่อประกอบท่อ สำหรับงานวิจัยนี้ จะมีการประกอบอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ ที่มีการสูญเสียทั้งหมด 2 จุดต่อได้แก่ บอลวาล์ว ข้องอ 60 องศา และการสูญเสียอื่นๆ ที่ทางเข้าและทางออกดังแสดงในรูปที่ 2.17



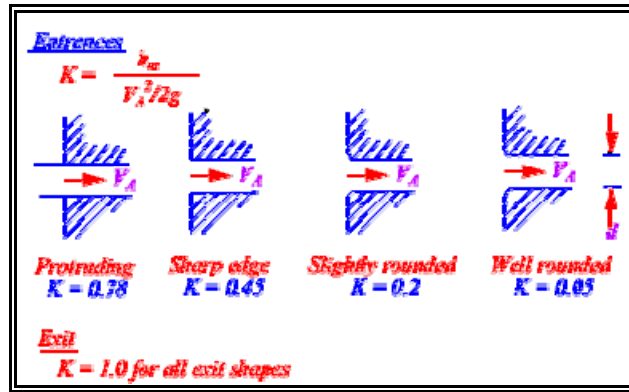
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของระบบท่อ

รูปที่ 2.17 เป็นส่วนประกอบของระบบท่อน้ำของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก จะเห็นว่าประกอบด้วยท่อแนวตรงที่ได้คำนวณการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานซึ่งเป็นการสูญเสียหลักไปแล้ว ส่วนที่เหลือจะเป็นอุปกรณ์ในการประกอบท่อทั้งหมดที่จะต้องนำมาคำนวณการสูญเสียตรงตามรูปประกอบด้วย เช่น ทางเข้า บอลวาล์ว ข้องอ 60 องศา และทางออก สัมประสิทธิ์การสูญเสียตรงจะแยกพิจารณาแต่ละตัวดังนี้

2.3.3.1 การสูญเสียทางเข้า เมื่อของเหลวไหลจากถังขนาดใหญ่หรืออ่างเก็บน้ำเข้ามาในท่อตามรูปที่ 2.18 ค่าความสูญเสียจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่างของปากทางเข้า เช่น ถ้าปากทางเข้ามีผิวโค้งเรียบ การสูญเสียมีค่าน้อยมาก เป็นต้น ค่าการสูญเสียจะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสูญเสียตรง ตามลักษณะของปากทางเข้า ดังรูปที่ 2.19

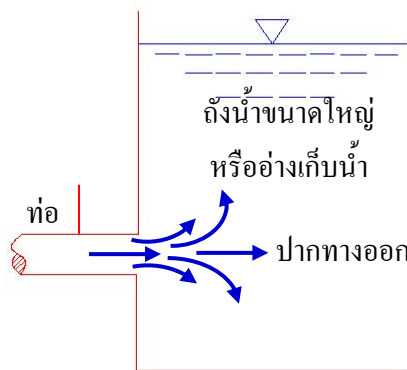


รูปที่ 2.18 ทางเข้า



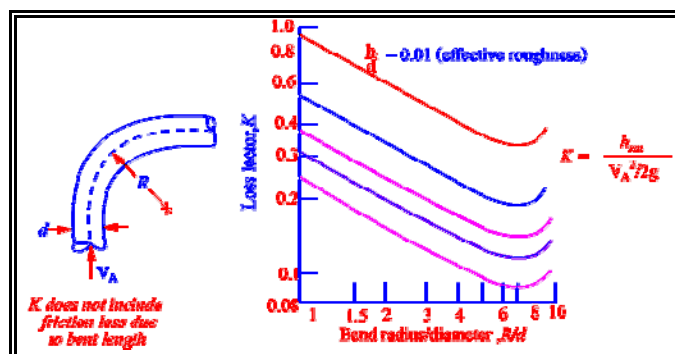
รูปที่ 2.19 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางเข้าและทางออก, [19]

2.3.3.2 การสูญเสียทางออก เมื่อของเหลวไหลออกจากท่อเข้าสู่ถังน้ำขนาดใหญ่หรืออ่างเก็บน้ำ ตามรูปที่ 2.20 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ปากทางออกจะมีค่าเท่ากัน ไม่ว่าปากทางออกจะมีลักษณะอย่างไร ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.20 ทางออก

2.3.3.3 การสูญเสียในท่อโค้ง เมื่อของไหลมีการไหลเปลี่ยนทิศทางในท่อโค้ง ตามรูปที่ 2.21 จะมีการสูญเสียเกิดขึ้น คำนวณหาค่าการสูญเสียได้ เมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองได้ตามรูป



รูปที่ 2.21 ท่อโค้งและการหาค่า K, [19]

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลผ่านอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ เช่น วาล์ว ข้องอ สามทางจะแสดงตามตารางที่ 2.5 ส่วนบอลวาล์วจะแสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียรอง ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของบอลวาล์ว

ชนิดของบอลวาล์วที่มีผลต่อการสูญเสีย	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง
Ball Valve, Fully Open	0.05
Ball Valve, 1/3 Closed	5.5
Ball Valve, 2/3 Closed	200

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $K = \frac{h_m}{v_1^2 / 2g}$  สำหรับวาล์วที่เปิด ข้องอ และสามทาง

เส้นผ่าศูนย์กลาง,in.	ต่อด้วยสกกรู				ต่อด้วยหน้าแปลน				
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
วาล์ว (เปิดเต็มที่)									
โกลบวาล์ว	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5
เกทวาล์ว	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.003
สวิงเช็ควาล์ว	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
แองเกิลวาล์ว	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
ข้องอ									
45 องศา	0.39	0.32	0.30	0.29					
45 องศา รัศมียาว					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90 องศา	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90 องศา รัศมียาว	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180 องศา	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180 องศา รัศมียาว					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
สามทาง									
ไหลทางตรง	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
ไหลทางแยก	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41

ตารางที่ 2.6 ค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากการเปิดวาล์ว

อัตราส่วน $K/K_{open}$		
เงื่อนไข	เกทวาล์ว	โกลบวาล์ว
เปิด	1.0	1.0
ปิด 25%	3.0-5.0	1.5-2.0
50%	12-22	2.0-3.0
75%	70-120	6.0-8.0

2.3.4 การสูญเสียจากหัวฉีด ซึ่งสามารถคำนวณค่า  $h_{nozzle}$  ได้ดังนี้

$$\text{จากสมการ } h_{L_{nozzle}} = \left( \frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \left( \frac{v_j^2}{2g} \right)$$

$C_v$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วที่ได้ออกจากหัวฉีด ที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างความเร็วจริง

## 2.4 การคำนวณตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณ (Energy Conservation) จะได้ว่าน้ำเมื่อตกลงมาพลังงานศักย์ของน้ำจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้, [11]

$$E_p = E_k$$

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v^2 = 2gH$$

$$v = \sqrt{2gH} \quad (2.67)$$

ความเร็วของน้ำหาค่าได้จาก  $v = \sqrt{2gH}$

โดยที่  $v$  คือ ความเร็ว (m/s)

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (มีค่าคงที่  $9.8 \text{ m/s}^2$  หรืออาจใช้ค่าประมาณ  $10 \text{ m/s}^2$  เพื่อสะดวกต่อการคำนวณ)

$H$  คือ ความสูง (m)

พิจารณาการไหลของน้ำที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัด  $A$  ด้วยความเร็ว  $v$  จะได้ปริมาตรของการไหลของน้ำ [7]

$$Q = AV \quad (2.68)$$

สามารถหาโมเมนต์ขับเคลื่อนที่ขบลิ้อได้ดังนี้ [12]

$$M_t = F \times \frac{D}{2} \quad (2.69)$$

สามารถหาแรงขับเคลื่อนที่ขบลิ้อได้ดังนี้ [12]

$$F' = 2m_s (c_1 - u') \quad (2.70)$$

จากสมการที่ (2.70) เราสามารถหาความเร็วขบลิ้อ  $u'$  ได้

$$u' = c_1 - \frac{F'}{2m_s} \quad (2.71)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นเราสามารถหาความเร็วรอบของลิ้อกังหันน้ำได้ดังนี้ [12]

$$n' = \frac{60 \times u'}{\pi \times M_t} \quad (2.72)$$

## 2.5 การหาค่าความเร็วขบลิ้อ (Tip Speed Ratio)

ค่าสมรรถนะของกังหันน้ำที่เป็นที่สนใจก็คือกำลังงาน ซึ่งนำมาเสนอในรูปของเทอมไร้มิติเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงาน  $C_p$  กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio,  $R\Omega/V_\infty$ ) ตัวอย่างของค่าสมรรถนะดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูป 2.22 สมการที่ใช้คำนวณหาค่า Tip Speed Ratio อยู่ในสมการที่ 2.73

$$\lambda = \frac{\omega r}{V} \quad (2.73)$$

เมื่อ  $\omega = \frac{2\pi N}{60}$

$r$  = รัศมี

$V$  = ความเร็ว

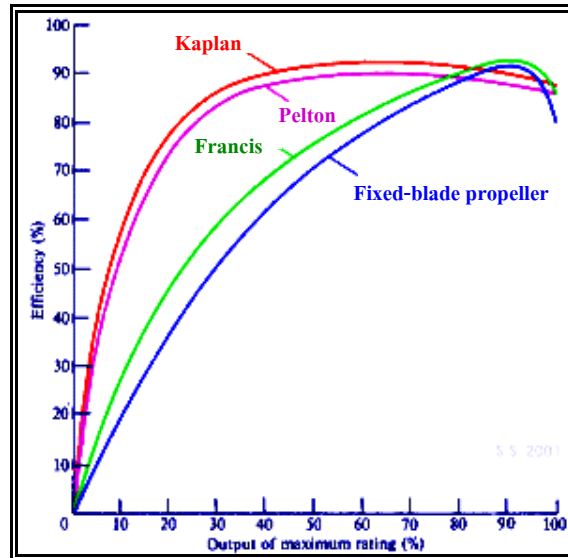
การคำนวณหาค่าความเร็วรอบการหมุน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วลำนน้ำเทียบกับกับระดับความสูง ซึ่งเป็นระดับอ้างอิงในการวิเคราะห์ผล และค่าความเร็วขบลิ้อซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการออกแบบลิ้อกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.74)

เมื่อ  $\lambda$  คือ ค่าความเร็วขบลิ้อ (Tip Speed Ratio) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.73)

$V_s$  คือ ค่าความเร็วลำนน้ำ ( $m/s$ )

$$RPM = \frac{V_s \cdot \lambda \cdot 60}{\phi_{WheelTurbine} \cdot \pi} \quad (2.74)$$





รูปที่ 2.22 แสดงถึงตัวอย่างค่าสมรรถนะของกังหัน, [13]

สมการต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ เป็นสมการที่ใช้วิเคราะห์กังหันน้ำ โดยใช้สมมุติฐานที่เรียบง่าย ในขณะที่ต้องการคำนวณค่าสมรรถนะของกังหันน้ำที่แม่นยำมากกว่าเดิมจะต้องนำผลต่างๆ ที่ละทิ้งไปในการวิเคราะห์แบบเรียบง่ายขึ้น นามารวมไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันน้ำอันได้แก่ ผลการหมุนของน้ำบริเวณล้อตัวกังหันน้ำเมื่อมันไหลผ่านใบกังหัน ซึ่งจะถูกแสดงเป็นค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำเชิงมุม  $a$  (Angular Induction Factor) ผลของการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss) ผลการสูญเสียที่คูล้อและผลของการแปรเปลี่ยนความเร็วของน้ำตามความสูง

## 2.6 การหาโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

จากสมการ 
$$\vec{L}_z = \sum \vec{L}_i = \sum m_i r_i^2 \omega \hat{k}$$

และ 
$$L_z = \sum m_i r_i^2 \omega \quad L_z = I_z \omega$$

จะได้ 
$$I_z = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 = 2mr^2 \quad (2.75)$$

## บทที่ 3

### วิธีเตรียมการและผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลโดยทั่วไปจะแบ่งขั้นตอนการดำเนินการเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนก่อนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล เป็นขั้นตอนในการคำนวณค่าตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการป้อนค่าลงสู่โปรแกรม CFdesign V9 หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนเตรียมแบบจำลองที่จะคำนวณ โดยเป็นการนำรูปทรงสามมิติของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ได้เขียนแบบไว้มาทำการสร้างเมช และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา หลังจากนั้นก็พร้อมที่จะนำแบบจำลองไปทำการคำนวณผล ในขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลทางวิศวกรรม CFdesign V9 เพื่อจำลองการไหลภายในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ในการศึกษาเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ( $k - \varepsilon$ ) โดยคำนวณตามทฤษฎี Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation (RANS) มีการกำหนดเงื่อนไขการเข้าสู่ของคำตอบ ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นขั้นตอนของการแสดงผล ซึ่งจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางโปรแกรม CFdesign V9 มาทำการแสดง เช่น การกระจายความดัน สนามความเร็วภายในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือผลลัพธ์อื่นๆ ที่น่าสนใจ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้เป็นการคำนวณค่าตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรม CFdesign V9 และวิธีเตรียมการก่อนเริ่มคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก หลังจากที่ได้ออกแบบรูปทรงเบื้องต้น และทำการเขียนแบบในสามมิติแล้ว จะต้องนำชิ้นส่วนต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าในแบบสามมิติที่ได้ออกแบบไว้ ได้แก่ วัสดุ และล้อกังหันน้ำ นำมาทำการสร้างเมชและกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเสียก่อน จึงจะนำไปทำการคำนวณเพื่อจะจำลองการไหล ของสนามการไหลภายในวัสดุกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นสามส่วน ในส่วนแรกเป็นการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ด้วยมือ ส่วนที่สองเป็นรายละเอียดในการสร้างเมช ส่วนที่สามเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการดังที่จะกล่าวต่อไป

#### 3.1 กรอบและแนวคิดในการศึกษา

- |              |   |
|--------------|---|
| ตัวแปรต้น    | คือ มุมองศาของวัสดุ น้ำ รูปทรงของวัสดุ น้ำ และอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก                        |
| ตัวแปรตาม    | คือ แรงบิดที่ผลิตได้จากกังหันน้ำต้นแบบ  |
| ตัวแปรควบคุม | คือ ความสูงของหัวน้ำ (Head)   |
| สมมุติฐาน    | คือ 1) ความดัน (Pressure) ทางเข้าและทางออกเท่ากับศูนย์<br>2) สภาพการไหลสำหรับการวิเคราะห์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ |

### 3.2 การคำนวณค่าตัวแปรเบื้องต้น

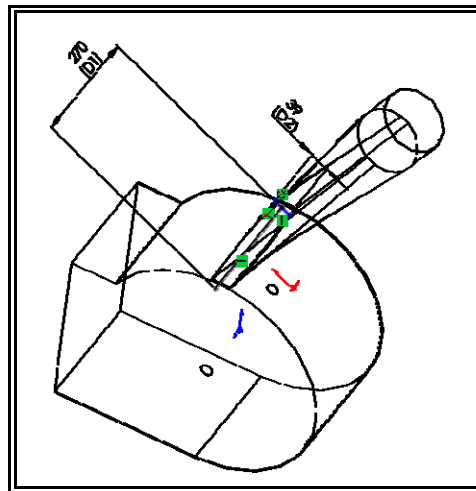
#### 3.2.1 การคำนวณหาความเร็วน้ำ

สามารถคำนวณได้จากสมการ  $v = \sqrt{2gH}$

$$\text{แทนค่าลงในสมการ} \quad v = \sqrt{2 \times (9.81) \times 4}$$

$$v = 8.86 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

เลือกใช้  $v = 9$  เมตรต่อวินาที ค่าความเร็วน้ำที่ยังไม่คิดการสูญเสีย  
เนื่องจาก เจ็ทน้ำของโวลูตน้ำมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของเจ็ทน้ำ

$\therefore$  อัตราการไหลของเจ็ทน้ำ

$$v_s = w \times l$$

$$= 0.27m \times 0.039m = 0.0105 \text{ ตารางเมตร}$$

$$= 0.0105m^2 \times 9m/s = 0.0945 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที}$$

$\therefore$  มวลน้ำ

$$M_s = 0.0945m^3/s \times 1000 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$= 94.5 \text{ กิโลกรัมต่อวินาที}$$

คำนวณหาแรงลัพท์ที่ข้อบดื้อ เมื่อ  $F = m_s(c_1 - c_2)$  โดยกำหนดให้โมเมนต์ขับเคลื่อนข้อบดื้อ  
กั้นน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก  $M' = 0.31kNm$

$$\therefore \text{แรงรับที่ข้อบดื้อ} \quad F = m_s(c_1 - c_2) \text{ เมื่อ } c_2 = 0$$

$$= m_s \cdot c_1$$

$$= 94.5 \text{ kg} / \text{s} \times 9 \text{ m} / \text{s}$$

$$= 850 \text{ นิวตัน}$$

ถ้าแรงรับที่ขอบล้อที่ใช้งานจริง  $F = 2m_s \times (c_1 - u')$

จะได้ความเร็วขอบล้อก้านน้ำ  $u' = c_1 - \frac{F}{2m_s}$

$$u' = 8.86 \text{ m} / \text{s} - \frac{850 \text{ N}}{2 \times 94.5} \text{ kg} / \text{s} = 4.50 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้นความเร็วรอบ  $n' = \frac{60 \times 4.50}{\pi \times 0.31} = 278.35 \text{ รอบต่อวินาที}$

∴ เลือกใช้ค่า = 278 รอบต่อวินาที ใช้ในการคำนวณ

### 3.2.2 การคำนวณหาพื้นที่การไหลของน้ำที่ทางออกจากถังน้ำ

ท่อทางออก เป็นอุปกรณ์หลักที่ทำการเชื่อมเข้ากับถังน้ำที่ด้านทางออกของน้ำก่อนต่อเข้ากับบอวลแล้ว จะเป็นชิ้นส่วนหลักในการพิจารณาอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 127 มิลลิเมตร

จากสมการ  $A = \frac{\pi d^2}{4}$

$$A = \frac{\pi \times 0.127^2}{4} = 0.013 \text{ m}^2$$

∴ อัตราการไหลของน้ำจะไหลผ่านพื้นที่ทั้งหมดทุกๆ ความยาวท่อ ผ่านหัวฉีดไปยังล้อก้านน้ำงานไหลออกสู่บรรยากาศ เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำจะเท่ากับพื้นที่การไหลคูณด้วยความยาวใดๆ ดังสมการ

$$Q = AL$$

$$\therefore Q = 0.013 \text{ m}^3 / \text{s}$$

ค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์

น้ำ	$\rho$	= มีค่าความหนาแน่น (Density)	998.2 kg/m <sup>3</sup>
	$\mu$	= มีค่าความหนืด (Viscosity)	0.001003 Pa.s
	$K$	= มีค่าการนำความร้อน (Conductivity)	0.6 W/m-K
	$C_p$	= มีค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)	4182 J/kg-K
	$P$	= มีค่าความดัน (Pressure)	101325 Pa
	$T$	= มีค่าอุณหภูมิ (Temperature)	19.85 Celsius
	$Z$	= มีค่า Compressibility	2.18565e+09 Pa

### 3.2.3 การหาโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

$$\text{จากสมการ } \vec{L}_z = \sum \vec{L}_i = \sum m_i r_i^2 \omega \hat{k}$$

$$\text{และ } L_z = \sum m_i r_i^2 \omega$$

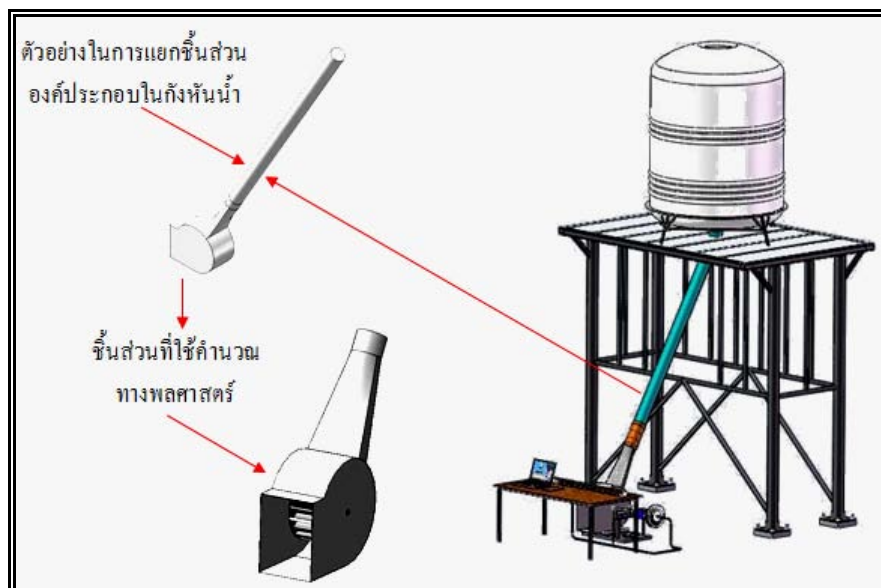
$$L_z = I_z \omega$$

$$\text{จะได้ } I_z = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 = 2mr^2$$

$$I_z = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 = 2 \times 16.12 \text{ kg} \times 0.155^2 \text{ m} = 0.774 \text{ กิโลกรัมตารางเมตร}$$

### 3.3 การสร้างเมช (Mesh Generation)

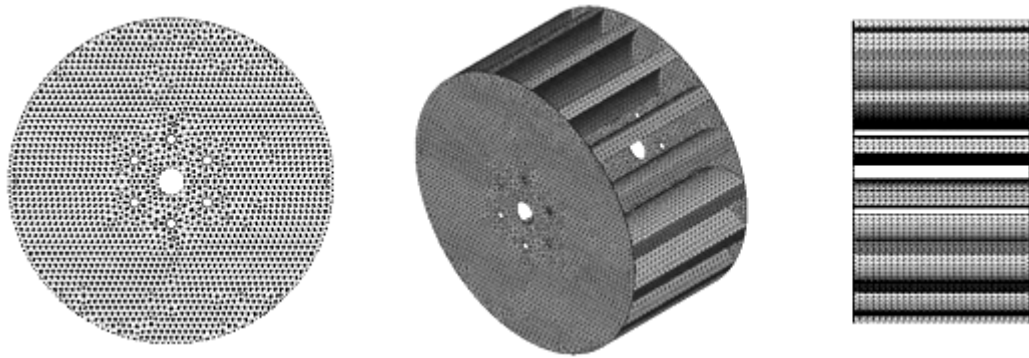
การจำลองการไหลในระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก จะต้องทำการแยกชิ้นส่วนของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการสร้างเมช ดังรูปที่ 3.2 โดยแบ่งออกเป็นช่องทางน้ำเข้าล้อยังกังหันน้ำ และช่องทางน้ำออกจากล้อยังกังหันน้ำ แต่ละชิ้นส่วนกำหนดขนาดของเมชให้มีความแตกต่างกัน ในส่วนของล้อยังกังหันน้ำและโวลูตเป็นส่วนที่มีความสำคัญมาก เพราะบริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็วในการไหลค่อนข้างสูง จึงต้องสร้างเมชให้กับโวลูตและล้อยังกังหันน้ำที่มีความละเอียดค่อนข้างสูง เนื่องจากภายในบริเวณล้อยังกังหันน้ำเกิดปรากฏการณ์อิมพัลส์ขึ้น เพราะล้อยังกังหันน้ำจะเปลี่ยนพลังงานจลน์จากความเร็วน้ำให้เป็นพลังงานกล ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดลองถูกต้องแม่นยำ จึงต้องทำการกำหนดเมชให้มีความละเอียดสูงในชิ้นส่วนดังกล่าว



รูปที่ 3.2 ระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

### 3.3.1 การสร้างเมชของล้อยก้านน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

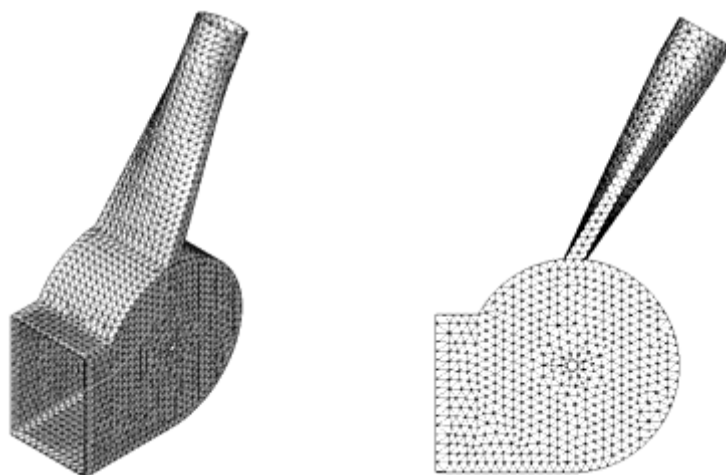
ส่วนของล้อยก้านน้ำเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็วอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำ จึงกำหนดให้เมชมีความละเอียดสูง เนื่องจากรูปทรงล้อยก้านน้ำ มีลักษณะซับซ้อนจึงต้องเลือกเมชที่มีรูปแบบ Tetrahedral จำนวนเมชเท่ากับ 242,075 เซลล์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะเมชของล้อยก้านน้ำ

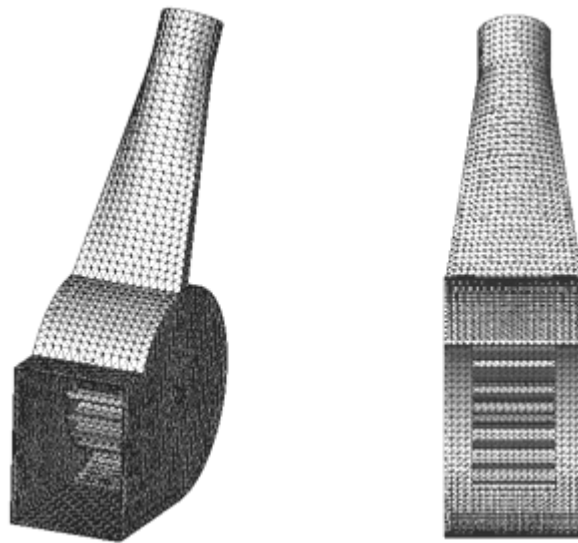
### 3.3.2 การสร้างเมชของโวลูต

ส่วนของโวลูตน้ำ เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็ว น้อยกว่าบริเวณล้อยก้านน้ำ ขนาดของเมชเอลิเมนต์ของโวลูต จึงให้เมชเอลิเมนต์ใหญ่กว่าวงล้อยก้านน้ำ เพื่อให้สามารถคำนวณจุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ได้ไวขึ้น เนื่องจากรูปร่างโวลูตน้ำมีลักษณะเป็นส่วนโค้งจึงเลือกใช้เมชรูปแบบเดียวกับล้อยก้านน้ำ เลือกเอลิเมนต์เป็นแบบ Tetrahedral จำนวนเมชเท่ากับ 195,452 เซลล์ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะเมชของโวลูตกังหันน้ำ

เมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนย่อยของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ ก็จะได้องค์ประกอบของระบบดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะเมชของระบบล้อยกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

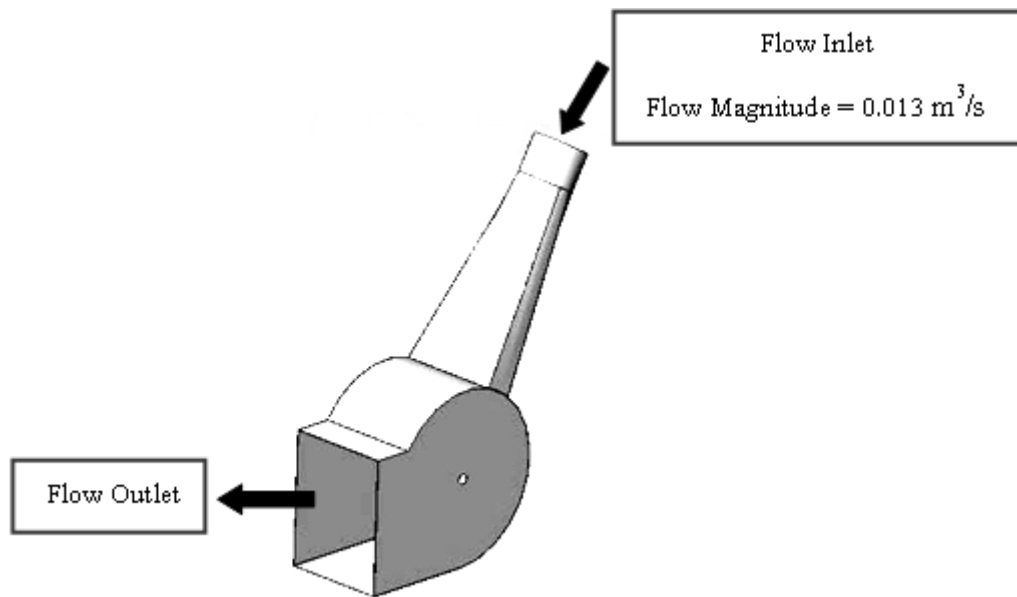
### 3.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

ในระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังรูปที่ 3.2 การไหลของน้ำเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ โดยน้ำไหลออกจากถังกักเก็บน้ำที่ปลายช่องทางน้ำเข้าของระบบกังหันน้ำ ผ่านช่องทางการไหลเข้าสู่ล้อยกังหันน้ำ ล้อยกังหันน้ำจะเกิดการหมุนภายในโวลูตเกิดปรากฏการณ์คิฟวชันทำให้พลังงานจลน์ของน้ำจะเปลี่ยนรูปกลายเป็นความดันและจะมีพลังงานบางส่วนเกิดการสูญเสียไป การที่พลังงานจลน์เปลี่ยนรูปกลายเป็นความดันนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของโวลูต หลังจากนั้นน้ำจึงไหลออกจากระบบสู่บรรยากาศ ซึ่งผลการจำลองการไหลครั้งนี้ โดยเลือกใช้ระบบพิกัดฉากแบบ 3 มิติ (X, Y, Z) และแกนอ้างอิงยึดอยู่กับที่ ซึ่งแนวแกนเพลลาของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจะอยู่ในแนวแกน Z แนวแกนของช่องทางน้ำออกอยู่ในแนวแกน X และระนาบกึ่งกลางโวลูตของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจะผ่านจุดอ้างอิง (0, 0, 0)

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองการไหลที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม CFX Design V9 มีการกำหนดดังนี้

#### 3.4.1 การใส่ค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณ (Apply Load to Model)

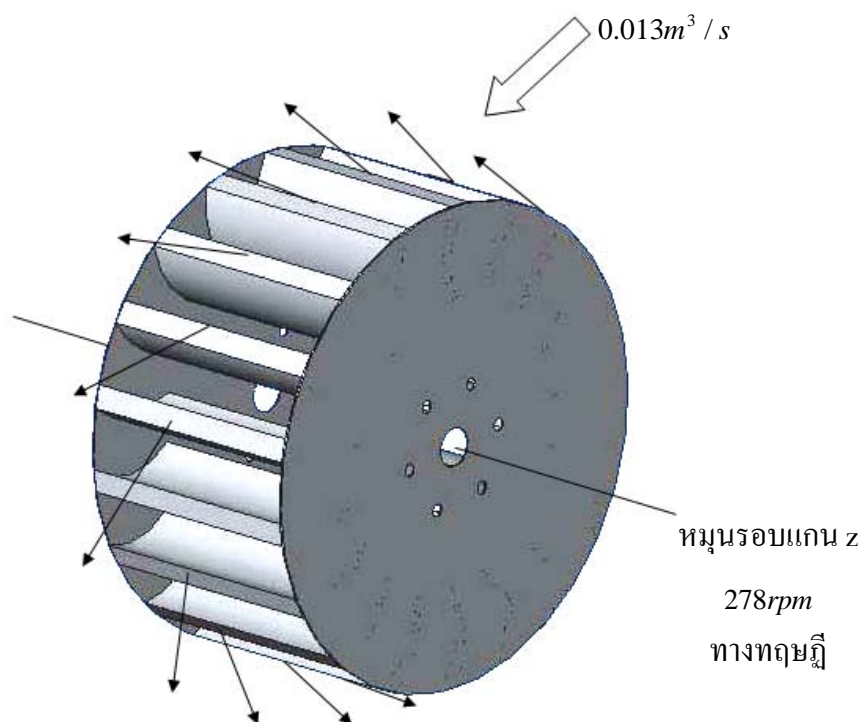
ปลายของท่อบริเวณช่องทางน้ำเข้ากำหนดให้บริเวณนี้มีอัตราในการไหลของน้ำเท่ากับ 9 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สำหรับช่องทางน้ำออกของโวลูต บริเวณนี้ความดันสถิตคงที่เท่ากับความดันบรรยากาศ รายละเอียดต่างๆ จะเป็นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณผล

#### 3.4.2 การกำหนดลักษณะการหมุนของล้อกังหันน้ำ

ส่วนล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก จะกำหนดให้มีการหมุน เป็นการหมุนแบบ Rotating Region ที่มีความเร็วในการหมุน Rotational Speed = 278 รอบต่อวินาทีเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือเบื้องต้นในหัวข้อที่ 3.1 การกำหนดขอบเขตของปัญหาจะเป็นไปดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เงื่อนไขขอบเขตล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก



### 3.5 การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล

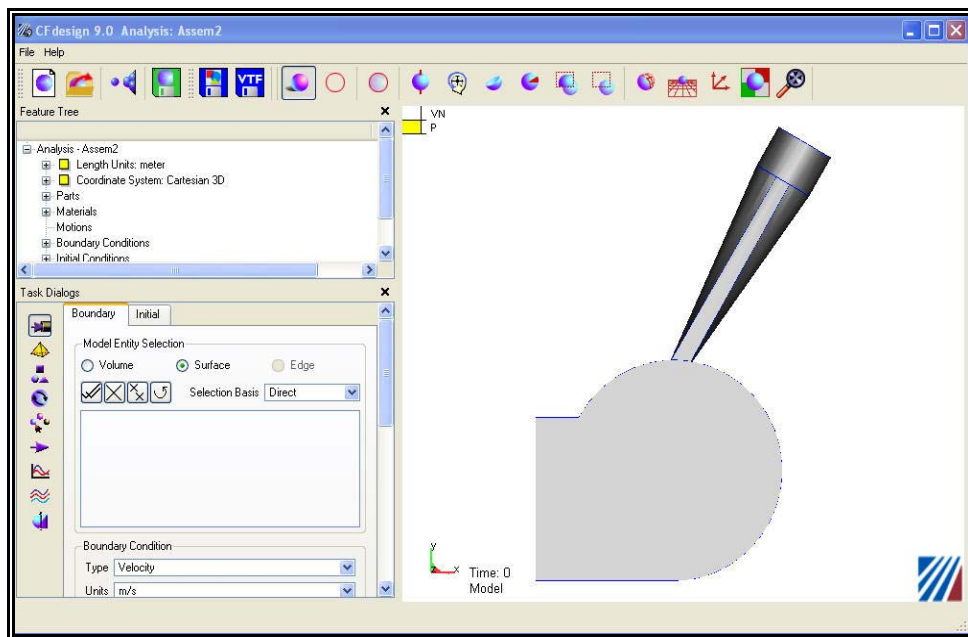
บทนี้จะนำเสนอผลของการทดลอง สำหรับการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่ทำการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFXdesign V9 โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ( $k-\epsilon$ ) เพื่อทำนายการกระจายความดันของสนามการไหล และทำการหาความเร็วรอบ เพื่อหาแรงบิดเบื้องต้น (Torque) ซึ่งผลการคำนวณและการจำลองการไหลนี้จะใช้อธิบายปรากฏการณ์และบ่งบอกถึงเสถียรภาพรวมถึงประสิทธิภาพของการไหลในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆที่สำคัญสำหรับการคำนวณผลเบื้องต้น ซึ่งได้จากการคำนวณผลทางภาคทฤษฎี จึงกำหนดให้ล้อกังหันน้ำนั้นหมุนด้วยความเร็วรอบการหมุนประมาณ 278 รอบต่อวินาที ที่ความเร็วเชิงเส้น 9 เมตรต่อวินาที จากผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นอาจจะไม่ได้ความเร็วรอบการหมุนตามผลที่คำนวณได้ทางทฤษฎี เพราะยังไม่ได้ทำการคำนวณผล การสูญเสียต่างๆ ของระบบ แต่ในเบื้องต้นจะใช้ค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีนี้ ใช้เป็นตัวแปรต้นเพื่อใช้สำหรับป้อนในโปรแกรม CFXdesign V9 เพื่อทำการจำลองสนามการไหล การกระจายความดัน ของน้ำภายในระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำเปรียบเทียบกับวัสดุที่ได้ออกแบบไว้ในแต่ละมุมมองหาเพื่อหามุมการไหลที่ดีที่สุดที่ทำให้ระบบการหมุนได้แรงบิด (Torque) มากที่สุด นอกจากนี้ ผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน ( $k-\epsilon$ ) ซึ่งยังสามารถอธิบายความเป็นไปต่างๆ ได้อีกหลายด้าน ภายใต้งานของขอบเขตของปัญหา และการลู่เข้าของคำตอบที่ถูกต้อง

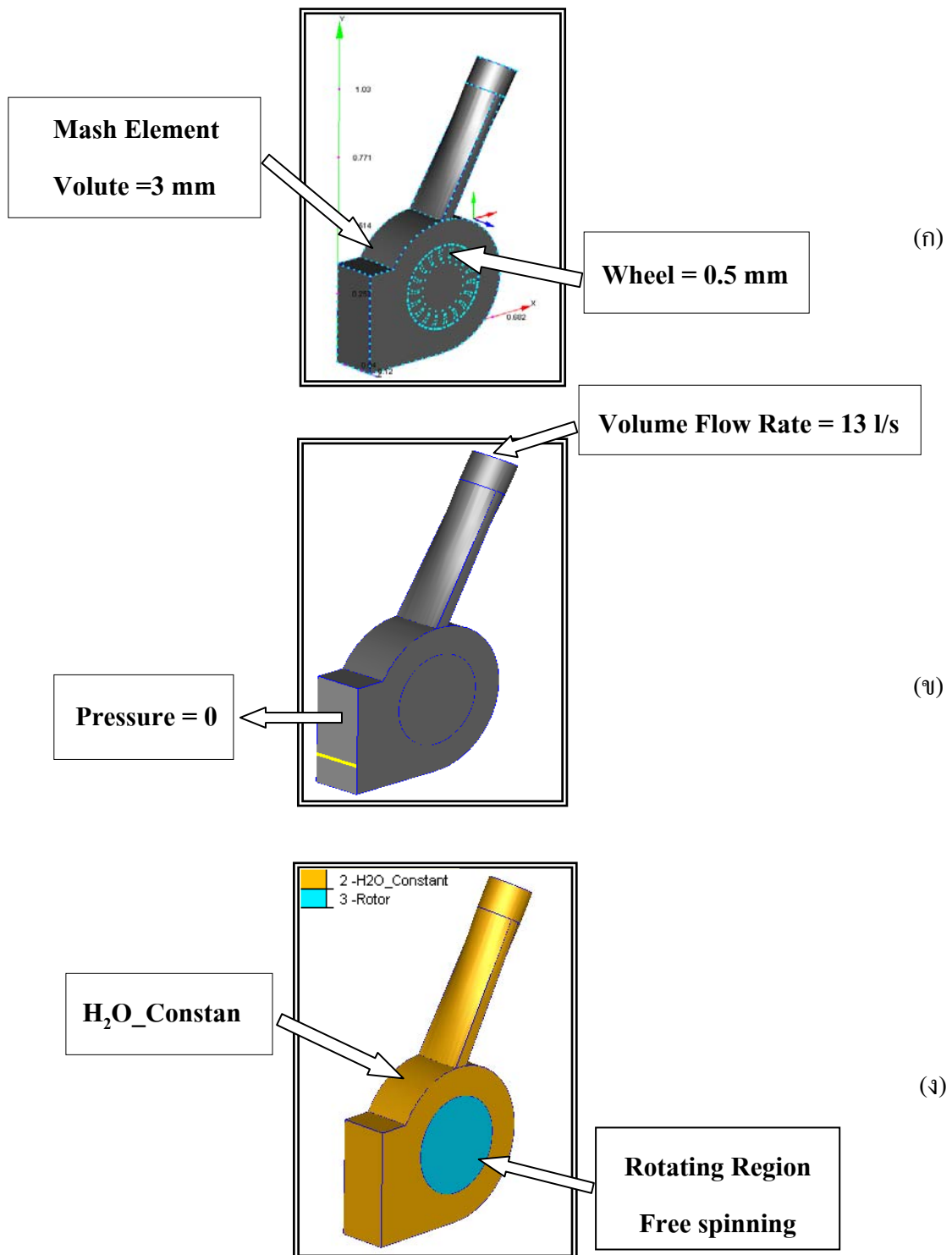
สำหรับเนื้อหาบทนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการคำนวณหาความเร็วรอบการหมุน โดยใช้โปรแกรม CFXdesign V9 ทำการคำนวณรอบการหมุนแบบ (Free Spinning) รอบต่อวินาที (RPM) เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณหาความเร็วรอบ (RPM) ทางทฤษฎี โดยใช้หลักการปรับเอลิเมนต์ให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องและใกล้เคียงผลทางทฤษฎี โดยสมมุติให้มุมออกแบบอยู่ที่มุม 60 องศาเป็นมุมทดลอง ส่วนที่สองเป็นการคำนวณเพื่อจำลองสนามการไหล และการกระจายความดัน ภายในระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก กับการไหลในมุมวัสดุที่ออกแบบไว้ 6 มุม คือมุม 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา เพื่อหามุมการไหลที่เหมาะสมที่สามารถผลิตแรงบิดให้กับระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่สุด ส่วนที่สามจะเป็นการเปรียบเทียบผลจากการศึกษาเบื้องต้น เพื่อทำการสรุปผล และทำการวิเคราะห์ผล จากมุมมองต่างๆ ที่ทำการออกแบบไว้ จาก CAD ก่อนที่จะทำการคำนวณผลในลักษณะต่างๆ จากโปรแกรมต่อไป

ก่อนที่จะทำการคำนวณผลจะต้องศึกษาองค์ประกอบเบื้องต้นก่อนที่จะทำการคำนวณผล เพราะการใช้ CFD ในการจำลองผลต่างๆเพื่อให้ได้ความถูกต้อง เป็นไปตามทฤษฎี จำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจแบบต่างๆของชิ้นงานที่จะทำการวิเคราะห์ รวมไปถึงเส้นโปรไฟล์ต่างๆที่ประกอบขึ้นเป็นชิ้นส่วนของงาน จนถึงขั้นตอนในการขึ้นรูปชิ้นงาน

โปรแกรม CFXdesign V9 เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิศวกรรมที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์ในรูปของโปรแกรมสำเร็จรูป ง่ายต่อการใช้งาน เหมาะสำหรับนักออกแบบ นักวิจัย และวิศวกรในหลายสาขา โปรแกรมมีความสามารถคำนวณได้ทั้งสองมิติและสามมิติ รูปแบบการคำนวณสามารถคำนวณผลได้ทั้ง ของไหลที่เป็นน้ำ อากาศ ของไหลที่เป็นความร้อน เช่น การพาความร้อน การนำความร้อน การแผ่รังสีความร้อน รวมไปถึงด้านความถี่คลื่นต่างๆ การใช้โปรแกรม CFXdesign ได้ดี จะต้องมีความรู้พื้นฐานความรู้ด้านการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล เพราะ ถ้าชิ้นงานที่เขียนไม่เหมาะสมกับการทำงานจริง โปรแกรมก็จะไม่ทำการประมวลผล นอกจากนั้นจะต้องมีพื้นฐานทางด้านกลศาสตร์ของไหลซึ่งเป็นภาคทฤษฎี จึงจะใช้ CFD ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 3.8 หน้าต่างโปรแกรม CFXdesign V9



(ก) กำหนดขนาดเอลิเมนต์ที่ไวลุ่มน้ำและล้อกังหันน้ำ

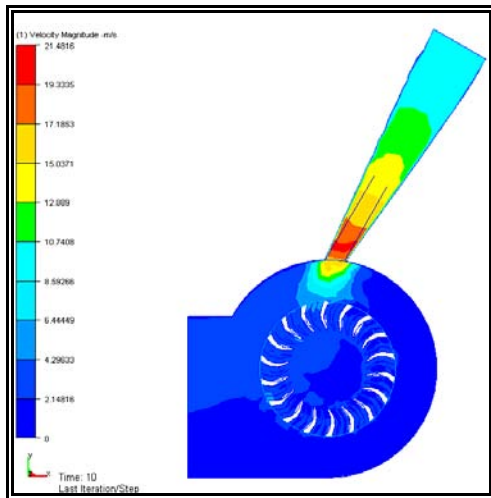
(ข) กำหนดอัตราการไหลที่ทางเข้า 13 l/s หรือ  $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$  ความดันทางออกเท่ากับศูนย์

(ง) H<sub>2</sub>O\_Constan คือค่าคงที่ของน้ำมาตรฐาน

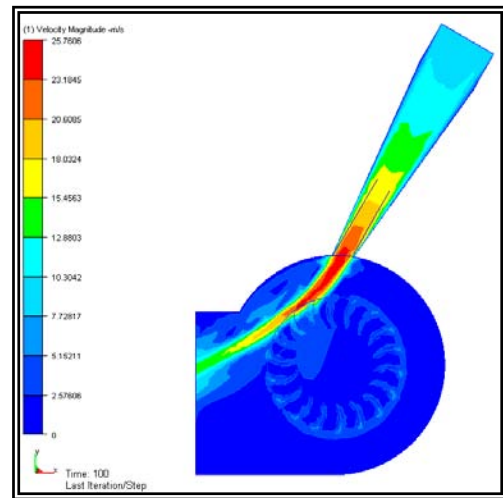
Rotating Region Free spinning คือการหมุนแบบอิสระตามความเร็ว

รูปที่ 3.9 การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) ในโปรแกรม CFdesign V9

### 3.6 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วรอบการหมุนแบบ (Free Spinning) RPM แบบปรับค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์

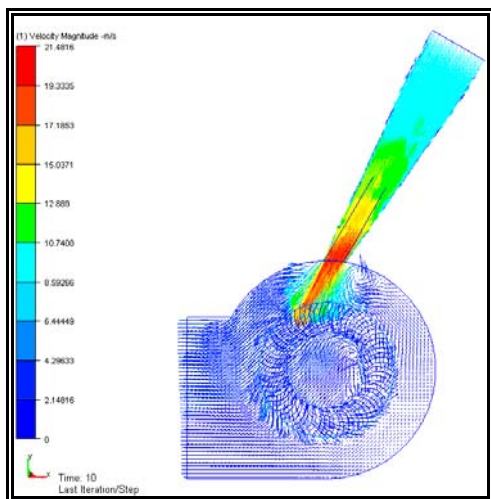


ก) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.45 เป็นค่ามาตรฐาน

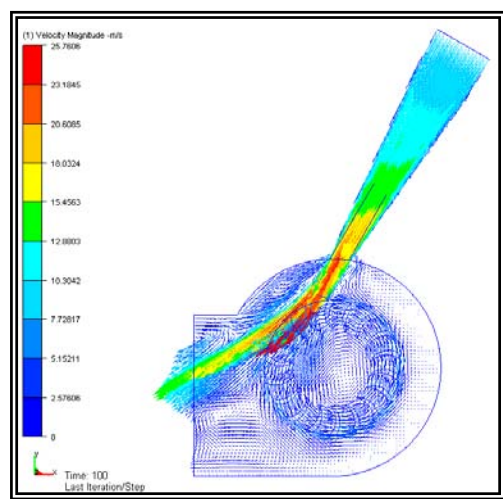


ข) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.25

รูปที่ 3.10 ผลการกระจายความดันภายในโวลูตกังหันน้ำ

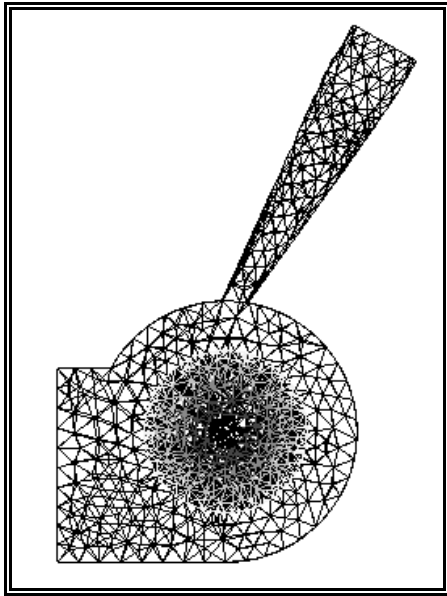


ก) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.45 เป็นค่ามาตรฐาน

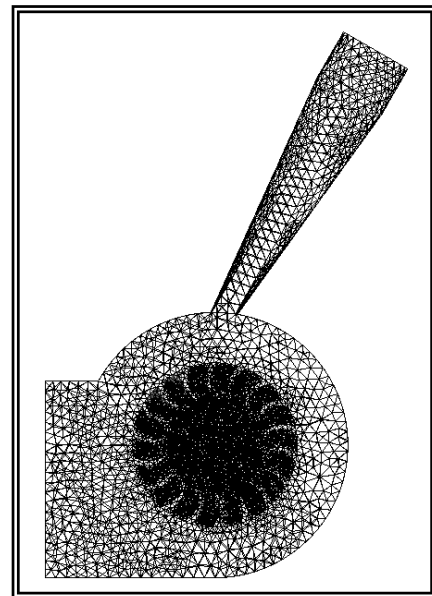


ข) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.25

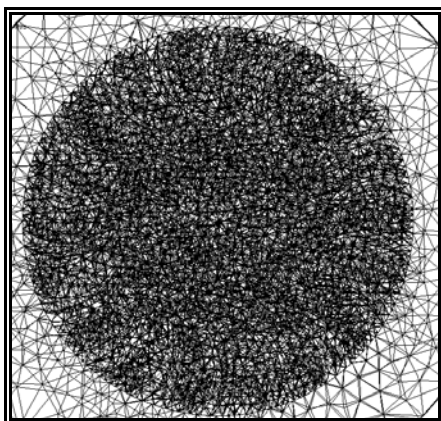
รูปที่ 3.11 สนามความเร็วภายในโวลูตกังหันน้ำ



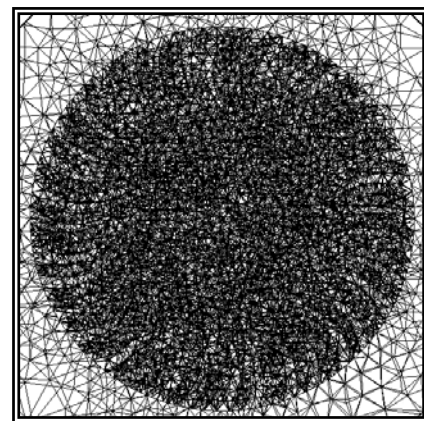
ก) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.45 เป็นค่ามาตรฐาน



ข) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.25



ค) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.45 เป็นค่ามาตรฐาน



ง) ค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.25

รูปที่ 3.12 เอลิเมนต์ที่ถูกปรับค่าแฟกเตอร์ก่อนการคำนวณ

### 3.6.1 ผลการคำนวณหารอบการหมุนทาง CFD เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

งานวิจัยได้ทำการหารอบการหมุน (RPM) โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้เบื้องต้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ เป็นตัวแปรสำคัญในการป้อนค่าลงในโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFdesign V9 โดยเลือกการคำนวณแบบ Free Spinning เพื่อหารอบการหมุน โดยอาศัยการปรับ แฟกเตอร์เอลิเมนต์ ซึ่งหลังการคำนวณสามารถสรุปผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1

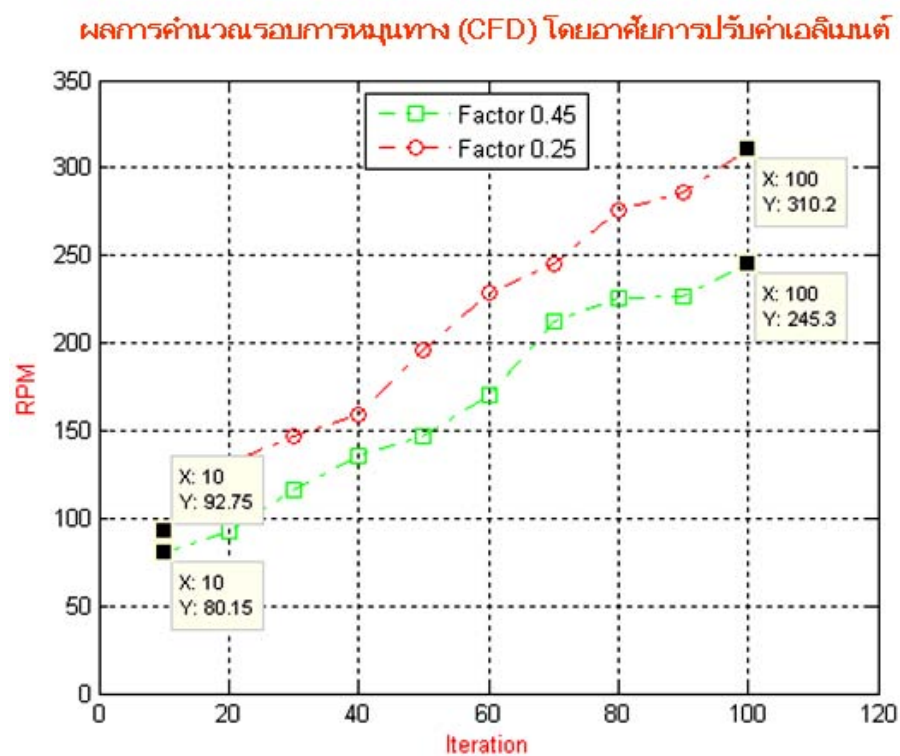
ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณรอบการหมุนทาง (CFD) โดยอาศัยการปรับค่าเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา

จำนวนรอบการคำนวณ ITERATIONS	แฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.45 (RPM)	แฟกเตอร์เอลิเมนต์ 0.25 (RPM)
10	80.15	92.75
20	92.17	131.87
30	100.27	146.52
40	135.12	159.17
50	146.72	195.98
60	150.71	228.92
70	212.79	245.27
80	225.61	276.12
90	226.78	285.76
100	245.27	310.12

จากผลการคำนวณที่ได้จากการจำลองสนามการไหลภายในโวลูตกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อหาความเร็วรอบการหมุน รูปแบบการคำนวณเป็นแบบ Rotating Region (Pre Spinning) โดยทำการปรับค่าแฟกเตอร์เอลิเมนต์ สามารถสรุปได้ว่า ค่าแฟกเตอร์มาตรฐานที่โปรแกรม CFdesign V9 ทำการกำหนดไว้นั้น เท่ากับค่า 0.45 หน่วย เมื่อทำการคำนวณและประมวลผลจนถึง 100 ครั้ง (Iteration) ได้ความเร็วรอบการหมุนสูงสุดที่ 245 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3.14 แต่การคำนวณทางทฤษฎีได้ความเร็วรอบ 278 รอบต่อนาที เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน จะได้ 13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการปรับค่าเอลิเมนต์เท่ากับค่า 0.25 หน่วย เมื่อทำการคำนวณและประมวลผลจนถึง 100 ครั้ง (Iteration) ได้ความเร็วรอบการหมุนสูงสุดที่ 310 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3.14 แต่การคำนวณทางทฤษฎีได้ความเร็วรอบ 278 รอบต่อนาที เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน จะได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับการคำนวณผลทางทฤษฎี

Rotating Region Results				
	Time (sec)	Hydraulic Torque (N-m)	Rotating Speed (RPM)	Hydraulic Force_X (Newton)
90	991	0.101901	255.24	-2.43916
91	992	0.0449261	265.45	-2.48988
92	993	-0.0245647	274.72	-2.21424
93	994	-0.175644	272.16	-2.63486
94	995	-0.000525255	280.47	-2.9099
95	996	-0.0313024	300.45	-3.23625
96	997	0.0831972	301.67	-3.19847
97	998	-0.0688921	300.64	-4.18026
98	999	0.0169874	305.17	-3.57268
99	1000	-0.00205799	310.12	-3.63613

รูปที่ 3.13 ผลลัพธ์การคำนวณผลแบบ Free Sprinting ในการหาค่าความเร็วรอบการหมุน ด้วยโปรแกรมคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFdesign V9)



รูปที่ 3.14 กราฟการปรับเอลิเมนต์ และ แสดงโปรไฟล์เปรียบเทียบผล (CFD)

ตารางที่ 3.2 สรุปผลการคำนวณรอบการหมุนที่มุมโวลูตต่างๆ (CFD)

รอบการ คำนวณ (Iteration)	มุมโวลูตกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (องศา)									
	Factor Element = 0.45					Factor Element = 0.25				
	30	40	50	60	70	30	40	50	60	70
10	79.78	81.76	92.64	80.15	91.12	79.87	91.76	94.45	92.75	93.24
20	97.75	97.45	110.76	92.17	102.98	98.65	101.75	115.13	131.87	124.41
30	105.76	105.72	120.42	100.27	125.72	110.61	110.54	127.18	146.52	139.43
40	110.78	112.87	128.15	135.12	128.71	112.78	115.72	135.51	159.17	143.76
50	125.76	128.56	134.72	146.72	131.76	130.79	139.76	176.72	195.98	199.51
60	136.51	136.75	169.47	156.71	166.75	139.47	167.92	182.97	228.92	228.45
70	187.65	196.72	199.98	212.79	215.74	197.43	210.78	230.46	245.27	246.73
80	212.17	220.16	224.45	225.61	230.72	220.76	228.46	245.78	276.12	257.16
90	215.65	225.29	235.76	226.78	242.98	225.48	230.75	255.61	285.76	297.98
100	225.64	230.78	236.74	245.27	254.51	229.74	232.17	254.17	310.12	309.45

### 3.7 การหาค่าความเร็วขอบใบ (Tip Speed Ratio)

ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า "Tip Speed Ratio" (TSR) คืออัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบพัดกังหันน้ำ (TSR) = ความเร็วที่ปลายใบพัดหมุน / ความเร็วลำนํ้า ณ เวลานั้นๆ ในบางกรณี ที่ปลายของใบพัดหมุนเร็วกว่าลำนํ้าที่วิ่งเข้ามาปะทะล้อและใบกังหันน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่มากกว่า ผลคือ เสียงดัง และทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น ขอบใบและล้อกังหันน้ำจะเกิดการล้าและชำรุดเร็ว (ในกรณีที่กระแสลำนํ้า มีเม็ดทรายละเอียดปะปนมากับกระแสนํ้าที่เร็วและแรงด้วย เพราะฉะนั้น ควรที่จะออกแบบ (TSR) ประมาณไม่เกิน 0.27-0.3 ถ้าจะออกแบบสร้างใบพัดและล้อกังหันน้ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 155 มิลลิเมตร หรือ (0.155 เมตร) และถ้าต้องการทราบค่า (RPM) คือ ค่าความเร็วรอบที่ที่รอบ ที่ใบพัดจะหมุนดีที่สุดที่ความเร็วลำนํ้า 9 เมตรต่อวินาที ที่ระดับความสูงของหัวน้ำ 4 เมตรน้ำ ที่จะเริ่มต้นผลิตพลังงานทางไฟฟ้า

ความเร็วรอบการหมุน (RPM) = ความเร็วลำนํ้าที่ระดับความสูงอ้างอิง x อัตราส่วนความเร็วขอบใบ x 60 / เส้นรอบวงของล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

$$RPM = 9 \text{ m/s} \times 0.27 \times 60 / (0.155 \text{ m} \times 3.14) = 299.56 \text{ RPM} \text{ ประมาณ } 300 \text{ รอบต่อนาที}$$

ในการออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ให้ได้สมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมที่สุด จำเป็นที่จะต้องรู้ค่าความเร็วขอบใบกังหัน (Tip Speed Ratio) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบค่าความเร็วเจ็ทน้ำ (ความเร็วลำนํ้า) กับการหมุน เพื่อใช้ในการออกแบบกังหันน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการหาค่าความเร็วขอบใบ หาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วเจ็ทน้ำรอบการหมุน (RPM) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อกังหันน้ำ

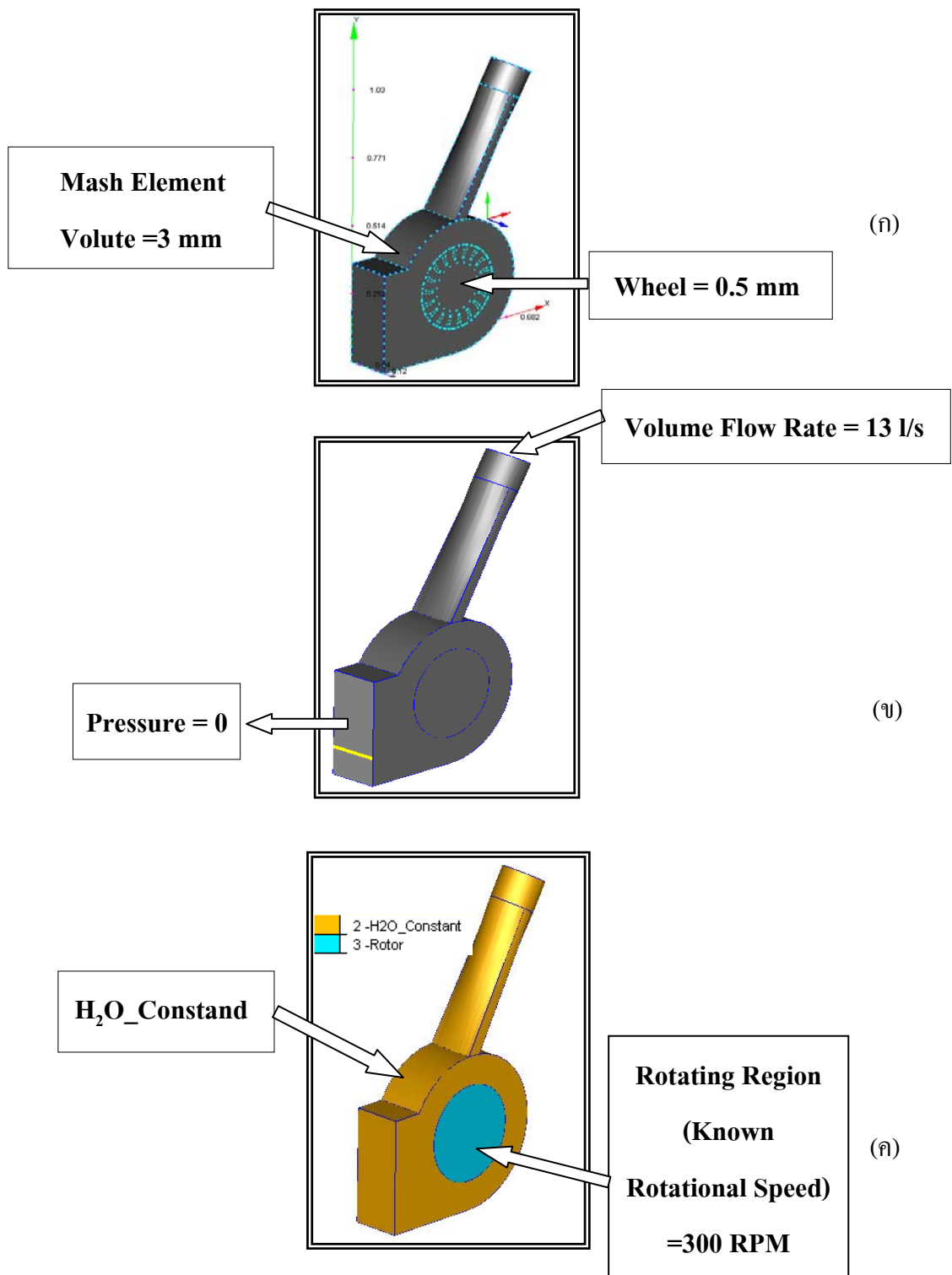


จากการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ได้ค่าความเร็วรอบการหมุนประมาณ 310 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเจ็ทน้ำ 9 เมตรต่อวินาที เส้นผ่านศูนย์กลางล้อยก้นน้ำ 0.155 เมตร ดังนั้น ตัวแปรเริ่มต้นสำหรับการคำนวณเลือกใช้ 0.27 เป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบ กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

### 3.8 การคำนวณผลทาง (CFD) เพื่อหาแรงบิด

หลังจากทำการคำนวณผลทางทฤษฎีและการคำนวณผลทาง CFD ได้ค่าความเร็วรอบการหมุนเบื้องต้นจึงทำการหาแรงบิด (Torque) เบื้องต้นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้โปรแกรม CFdesign V9 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบการคำนวณเป็นแบบ Rotating Region (Known Rotational Speed) โดยนำโวลูตที่ได้ออกแบบไว้ที่มุมเจ็ทน้ำต่างๆ คือ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาทำการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อจำลองสนามการไหลการหมุนของล้อยก้นน้ำที่มีผลต่อการผลิตแรงบิด (Torque) สำหรับหามุมการไหลที่ดีที่สุดที่เหมาะสมต่อการสร้างต้นแบบ

ข้อมูลสำหรับใช้ในการกำหนดขอบเขตของปัญหาในการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ความเร็วลำนน้ำ 9 เมตรต่อวินาที ความดันที่ทางออกมีค่าเท่ากับศูนย์เพราะเปิดสู่บรรยากาศ ความเร็วรอบการหมุนเป็นแบบ Rotating Region (Known Rotational Speed) ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที จาก (CFD) ขนาดเอลิเมนต์ที่โวลูตน้ำ ขนาดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ที่วงล้อยก้นน้ำ ขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จะสังเกตเห็นขนาดของเอลิเมนต์ของโวลูตน้ำนั้นมีขนาดใหญ่กว่าล้อยก้นน้ำเพราะเป็นส่วนที่เราไม่ต้องการทราบผลมากนักจึงกำหนดให้มีขนาดใหญ่กว่าล้อยก้นน้ำ ส่วนที่ต้องการความละเอียดกว่าคือส่วนที่ต้องการทราบผลมากที่สุด ขนาดของเอลิเมนต์ที่ล้อยก้นน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจึงมีขนาดที่เล็กกว่า วัสดุที่ใช้ในการคำนวณผลคือน้ำ ที่มีคุณสมบัติ ดังนี้ มีค่า ความหนาแน่น (Density)  $998.2 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนืด (Viscosity)  $0.001003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ค่าการนำความร้อน (Conductivity)  $0.6 \text{ W/m}\cdot\text{k}$  ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)  $4182 \text{ J/kg}\cdot\text{k}$  ค่าความดัน (Pressure)  $101325 \text{ Pa}$  ค่าอุณหภูมิ (Temperature)  $19.85 \text{ }^\circ\text{C}$  ค่า Compressibility  $2.18565\text{e}+09 \text{ Pa}$  เมื่อทำการกำหนดขอบเขตปัญหา (Boundary Condition) ดังรูปที่ 3.16 จึงเริ่มคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล



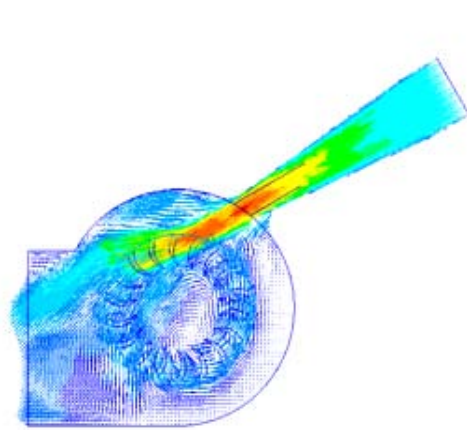
(ก) กำหนดขนาดเอลิเมนต์ที่โวลูตน้ำและล้อกังหันน้ำ

(ข) กำหนดอัตราการไหลที่ทางเข้า 13 l/s หรือ  $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$  ความดันทางออกเท่ากับศูนย์

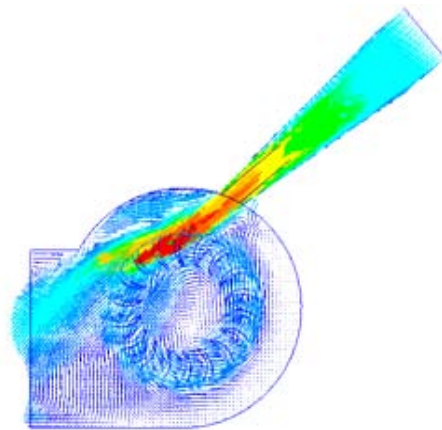
(ง) H<sub>2</sub>O\_Constand คือค่าคงที่ของน้ำ

Rotating Region (Known Rotational Speed) คือ ล้อกังหันน้ำหมุนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

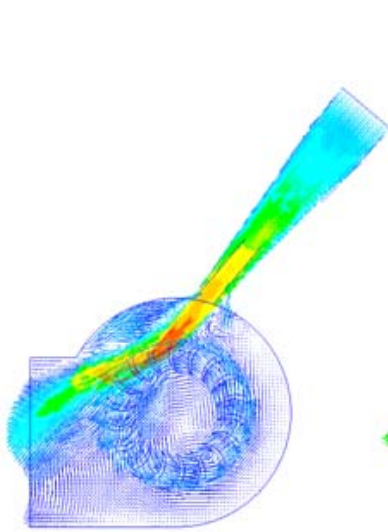
รูปที่ 3.15 การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) ในโปรแกรม CFdesign V9



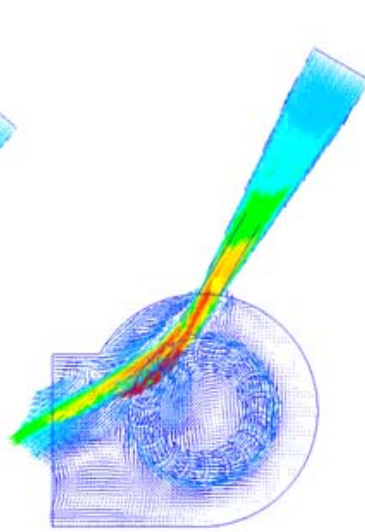
โวลูตน้ำที่มุม 30 องศา



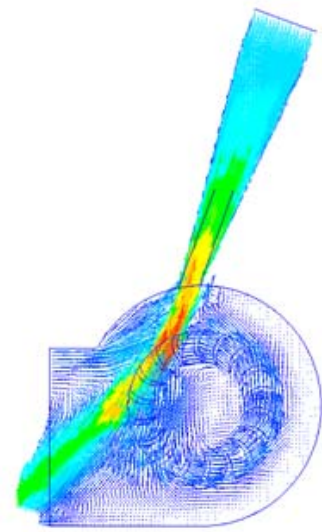
โวลูตน้ำที่มุม 40 องศา



โวลูตน้ำที่มุม 50 องศา



โวลูตน้ำที่มุม 60 องศา



โวลูตน้ำที่มุม 70 องศา

รูปที่ 3.16 ผลเฉลยของเวกเตอร์ความเร็วในสนามการไหล

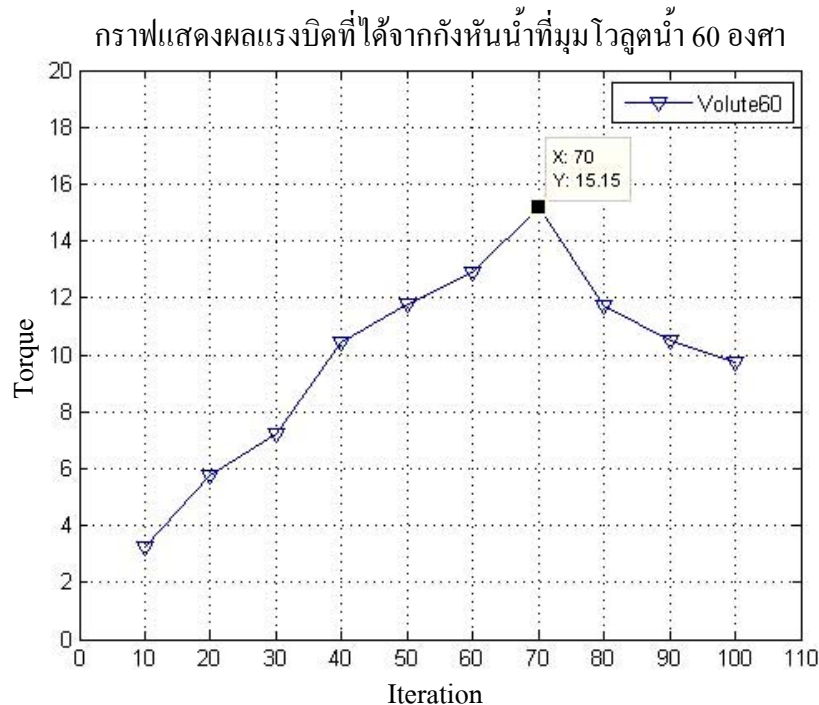
	Time (sec)	Hydraulic Torque (N-m)	Rotating Speed (RPM)	Hydraulic Force_X (Newton)
93	0.155	-12.1626	300	-22.6717
94	0.156667	-12.1482	300	-18.7043
95	0.158334	-12.2968	300	-20.8366
96	0.16	-13.3373	300	-22.7972
97	0.161667	-14.8838	300	-26.3487
98	0.163334	-14.0622	300	-25.0842
99	0.165	-14.164	300	-23.5767
100	0.166667	-15.1502	300	-25.6287

Rotor

Close

รูปที่ 3.17 ผลคำตอบที่คำนวณได้ทาง CFD ที่ 100 รอบการคำนวณในการหาแรงบิดใช้งาน

เมื่อกำหนดผลทางพลศาสตร์ของไหลครบทุกมุมมองสา จึงนำผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม CFdesign V9 มาเขียนกราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบผลระหว่างมุมมองที่ออกแบบพบว่า ที่มุมโวลูต น้ำ 60 องศา มีอัตราการไหลและได้แรงบิดมากที่สุด เมื่อเทียบกับมุมมองอื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แรงบิด (Torque) ที่มุม 60 องศา

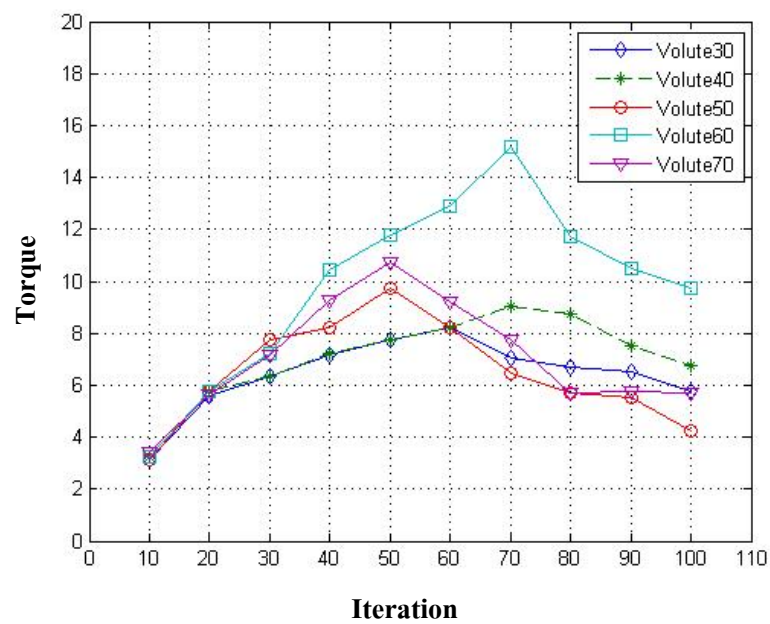
จากการศึกษาในการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อทำการคำนวณหาค่าต่างๆ เช่น การจำลองสนามการไหล อัตราการไหลต่างๆ หาความเร็วรอบการหมุน หาแรงบิดเบื้องต้น ภายในโวลูตกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยโปรแกรม CFdesign V9 พบว่าที่โวลูตกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มุม 60 องศา มีอัตราการไหลดีที่สุด และสามารถผลิตแรงบิดได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับมุมมองอื่น เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมดมาเขียนกราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบผล จะได้ดังรูปที่ 3.19

ตารางที่ 3.3 แรงบิดใช้งานทุกรอบการคำนวณ เปรียบเทียบทุกมุมมองสา (CFD)

รอบการคำนวณ (Iteration)	มุมมองต่างๆ ของโวลูตน้ำ (องศา)				
	30	40	50	60	70
10	3.14	3.24	3.14	3.25	3.44
20	5.57	5.77	5.76	5.76	5.66
30	6.35	6.35	7.45	7.25	7.15
40	7.14	7.24	8.24	10.44	9.24
50	7.76	7.76	9.76	11.76	10.76

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

60	8.21	8.21	8.21	12.91	9.21
70	7.05	9.05	6.45	15.15	7.75
80	6.72	8.72	5.72	11.72	5.72
90	6.51	7.51	5.51	10.51	5.74
100	5.76	6.76	4.26	9.76	5.7



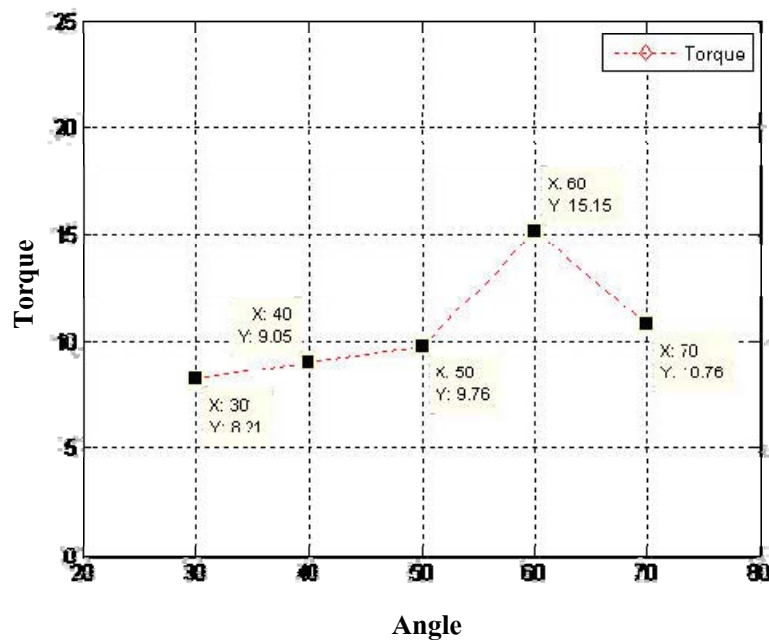
รูปที่ 3.19 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดที่มุมองศาต่างๆของโวลูตกั้นน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (CFD)

ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบมุมท่ोजี้น้ำกับแรงบิด (CFD)

มุมท่ोजี้น้ำ (องศา)	แรงบิดที่ได้ (Torque) N-m
30	8.21
40	9.05
50	9.76
60	15.15
70	10.76

เมื่อทำการทดสอบและประมวลผลทางพลศาสตร์ของไหล ผ่านการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม CFdesign V9 ทุกมุมมองของเจ็ทน้ำของกังหันน้ำ สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.4 พบว่า ที่มุม 60 องศาเจ็ทน้ำให้แรงบิดใช้งานมากที่สุดที่ 15 นิวตันเมตร แต่ค่าตัวแปรที่ได้จาก (CFD) ยังเป็นค่าตัวแปรที่ยังไม่คิดอัตราการสูญเสียในระบบ เมื่อคิดอัตราการสูญเสียแล้ว ค่าตัวแปรนี้ ยังสามารถอาจลดลงอีก ตามสภาพการใช้งานจริง ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

กราฟเปรียบเทียบแรงบิดที่มุมเจ็ทน้ำต่าง (CFD)

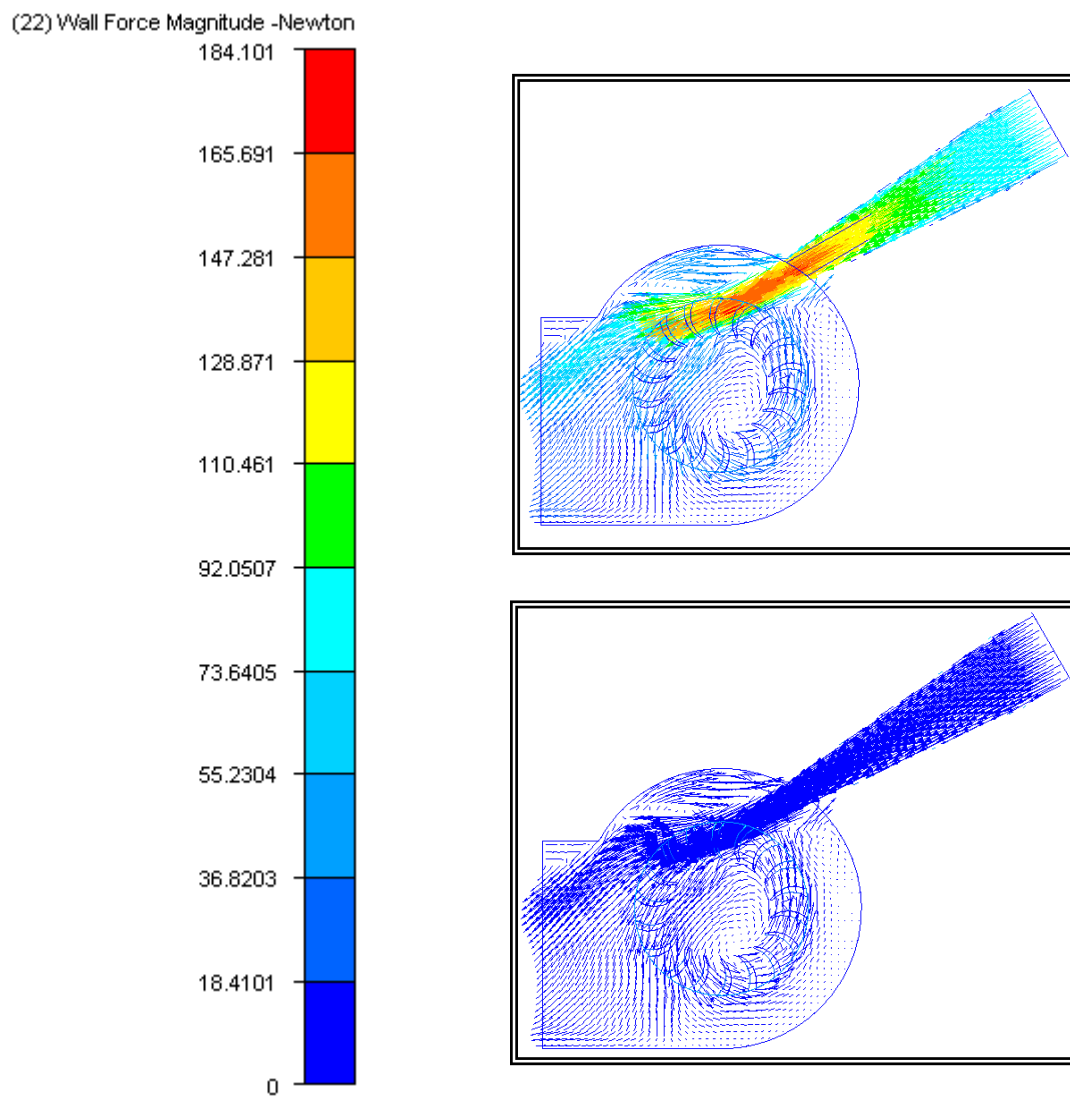


รูปที่ 3.20 ผลการเปรียบเทียบมุมต่อเจ็ทน้ำกับแรงบิดจาก (CFD)

### 3.9 ผลเฉลยของคำตอบในลักษณะต่างๆ ในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าที่มุมมองต่างๆ

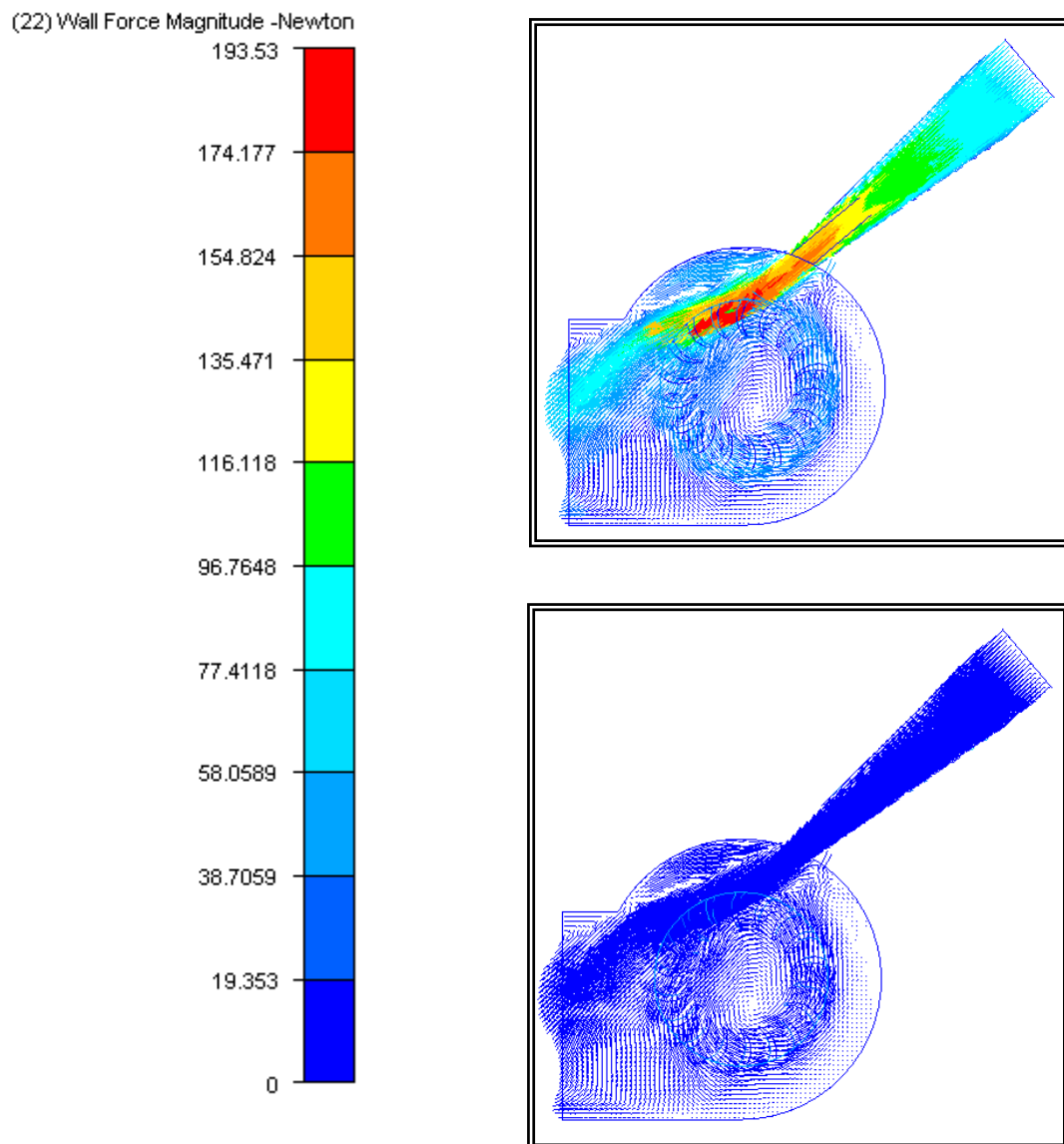
#### 3.9.1 แรงกระทำที่ล้อยังกังหันน้ำ (Wall Force)

##### 3.9.1.1 แรงกระทำที่ล้อยังกังหันน้ำที่มุม 30 องศา



รูปที่ 3.21 ผลเฉลยของแรงกระทำที่ล้อยังกังหันน้ำที่มุม 30 องศา

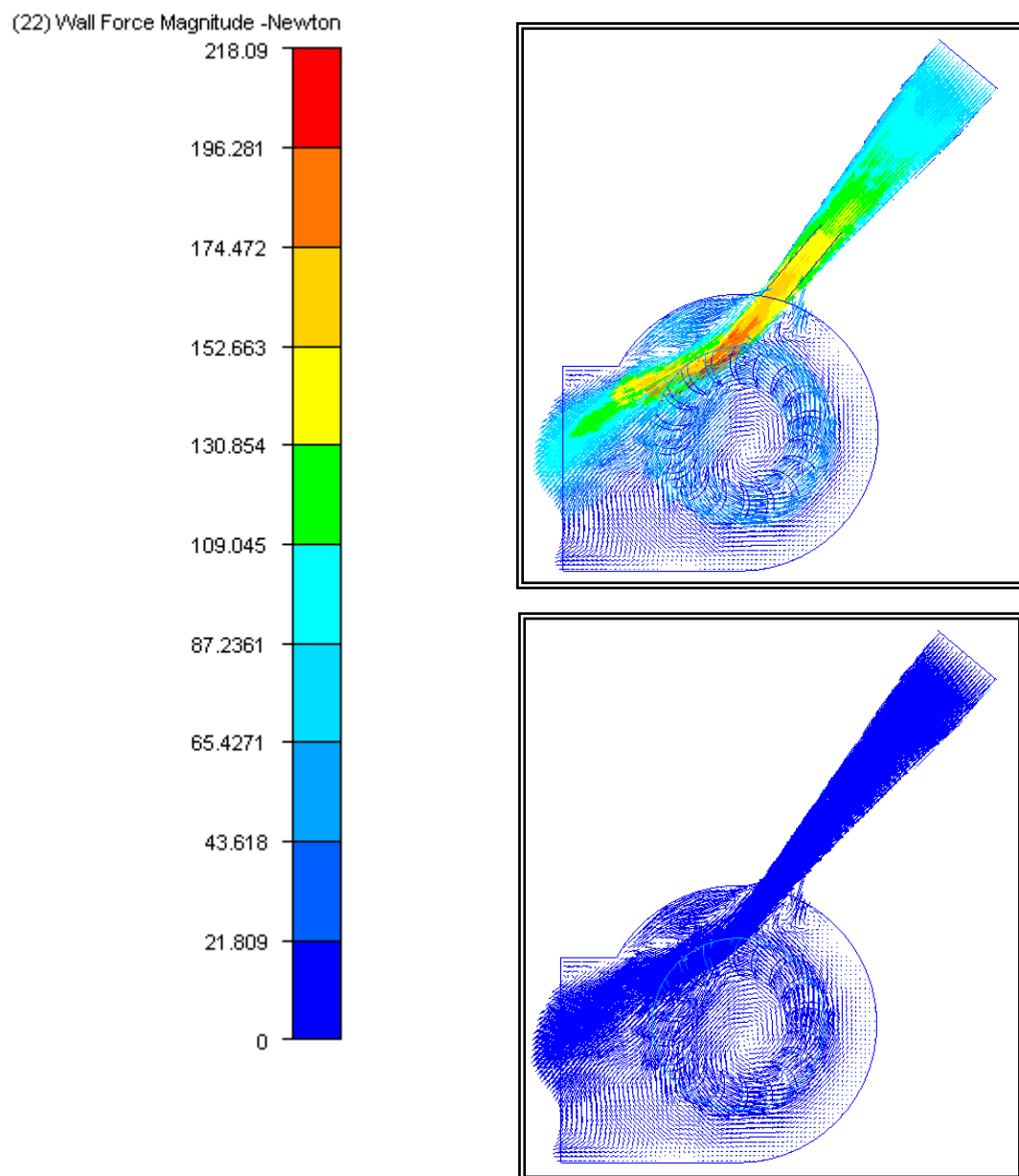
### 3.9.1.2 แรงกระทำที่ล้อยก้นน้ำที่มุม 40 องศา



รูปที่ 3.22 ผลเฉลยของแรงกระทำที่ล้อยก้นน้ำที่มุม 40 องศา

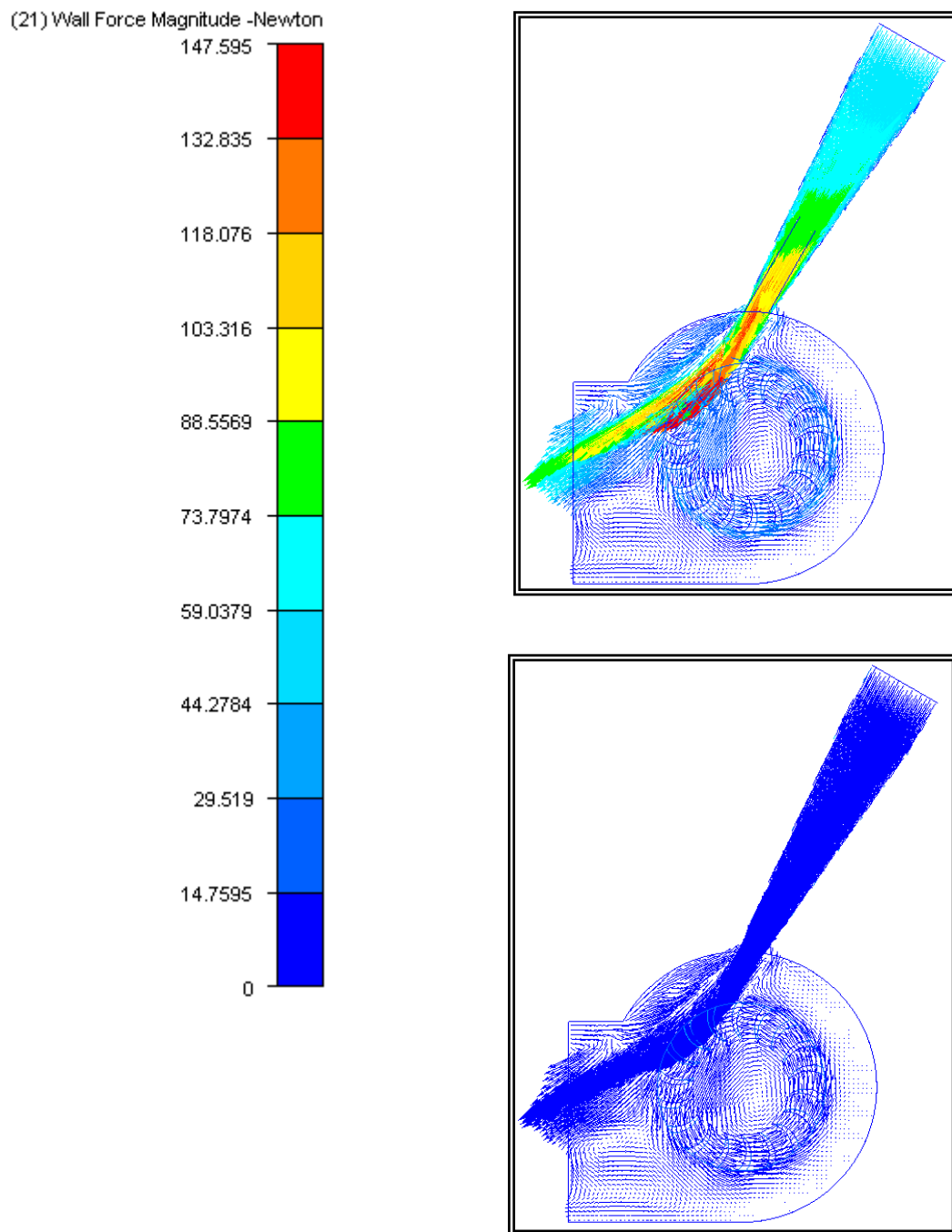


### 3.9.1.3 แรงกระทำที่ล้อยก้นน้ำที่มุม 50 องศา



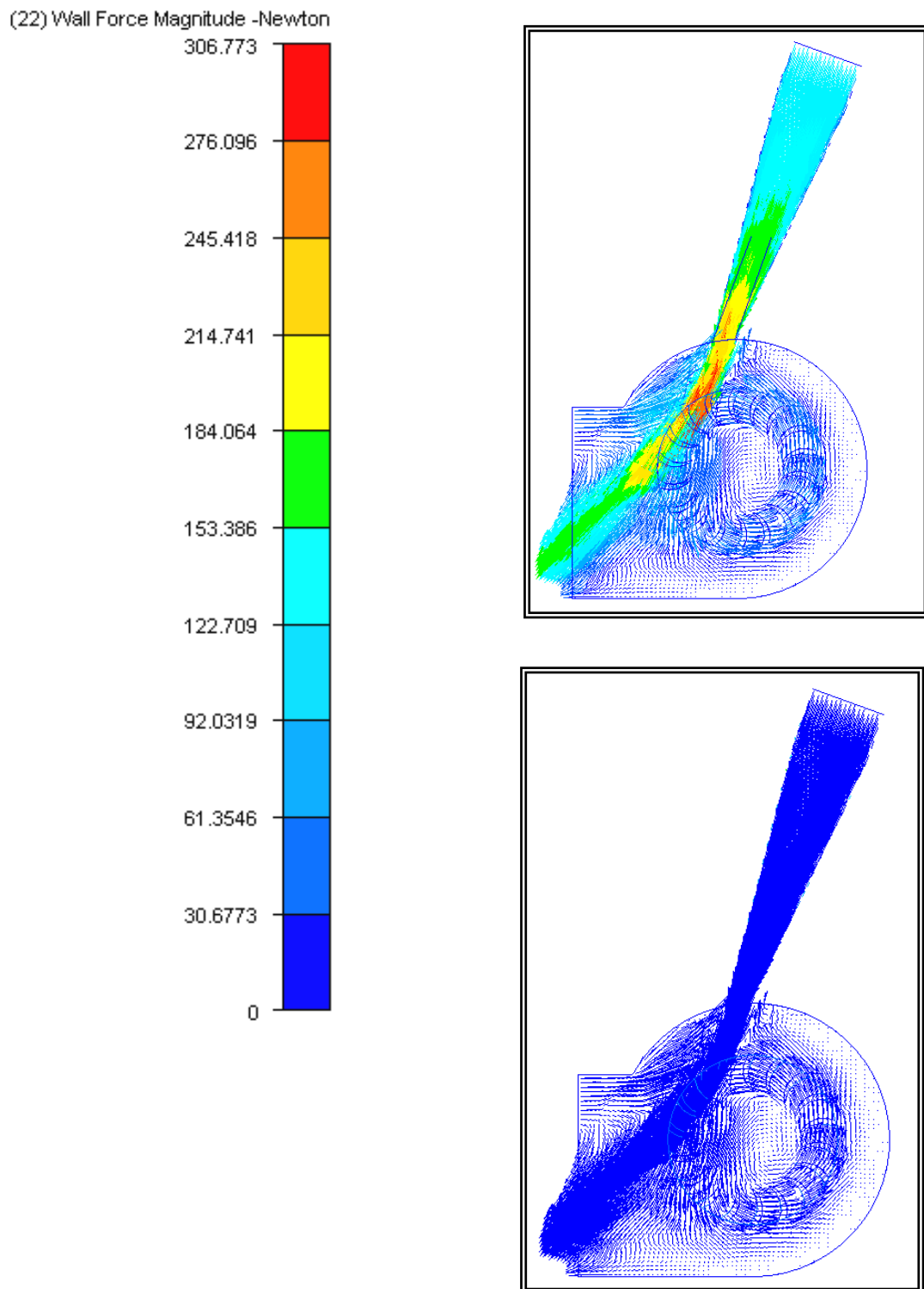
รูปที่ 3.23 ผลเฉลยของแรงกระทำที่ล้อยก้นน้ำที่มุม 50 องศา

### 3.9.1.4 แรงกระทำที่ล้อยก้านน้ำที่มุม 60 องศา



รูปที่ 3.24 ผลเฉลยของแรงกระทำที่ล้อยก้านน้ำที่มุม 60 องศา

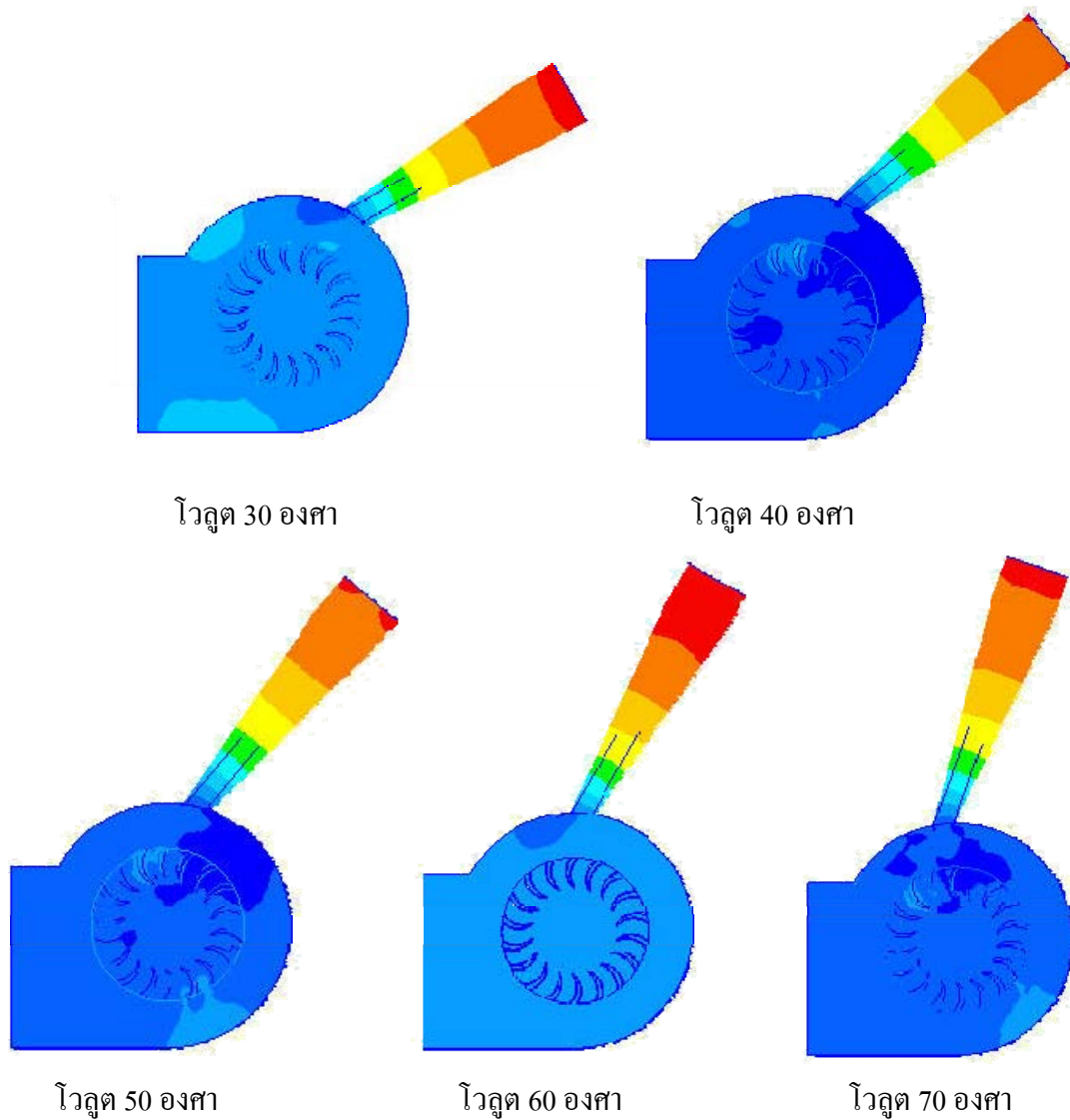
### 3.9.1.5 แรงกระทำที่ล้อยก้นน้ำที่มุม 70 องศา



รูปที่ 3.25 ผลเฉลยของแรงกระทำที่ล้อยก้นน้ำที่มุม 70 องศา

### 3.9.2 ความดัน (Pressure)

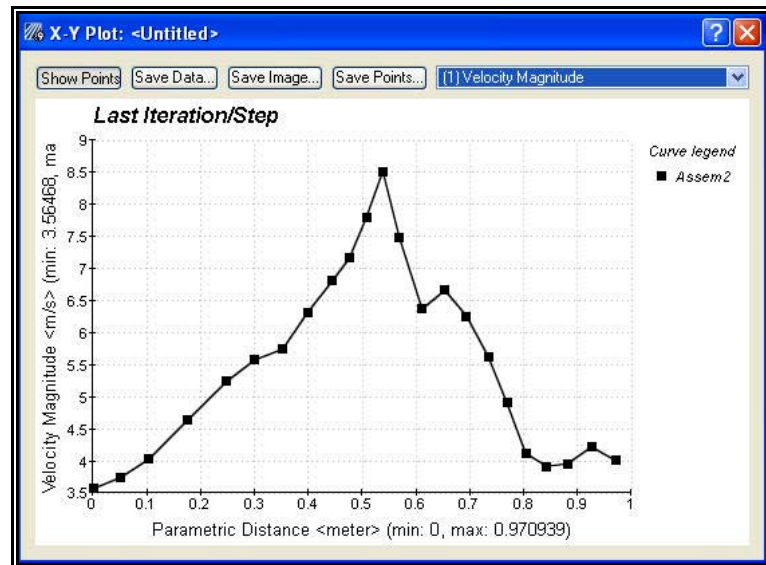
ผลการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหล ส่งผลให้เกิดการกระจายความดันขึ้นในโวลูตน้ำที่มีความเร็วลำนํ้าที่ทางเข้าหัวฉีด 9 เมตรต่อวินาที การกระจายความดันมีผลอย่างมากต่อการหมุนและการสร้างแรงบิด ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า การกระจายความดันและสนามการไหลของล้อยก้นห้นน้ำและโวลูตน้ำ มีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ผลเฉลยของความดันในรูปสนามการไหล

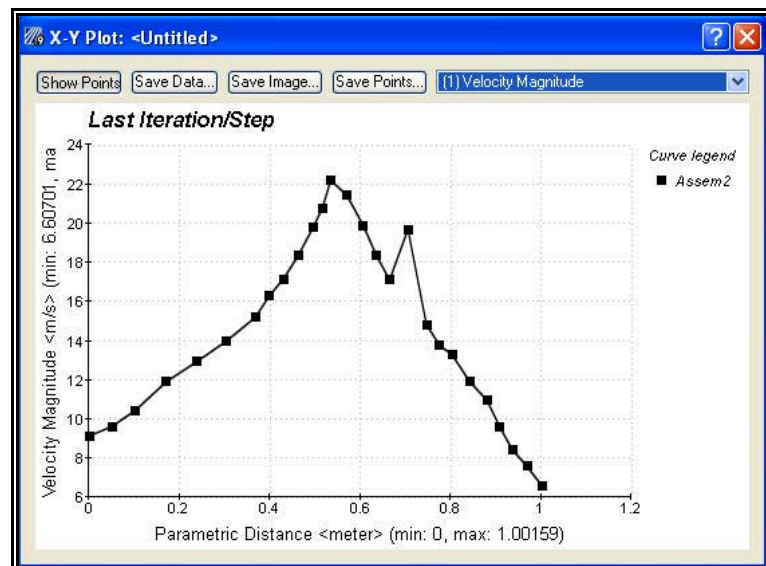
### 3.9.3 การแสดงผลในรูปแบบฟังก์ชันกราฟโปรไฟล์

#### 3.9.3.1 กราฟโปรไฟล์แสดงผลความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 30 องศา



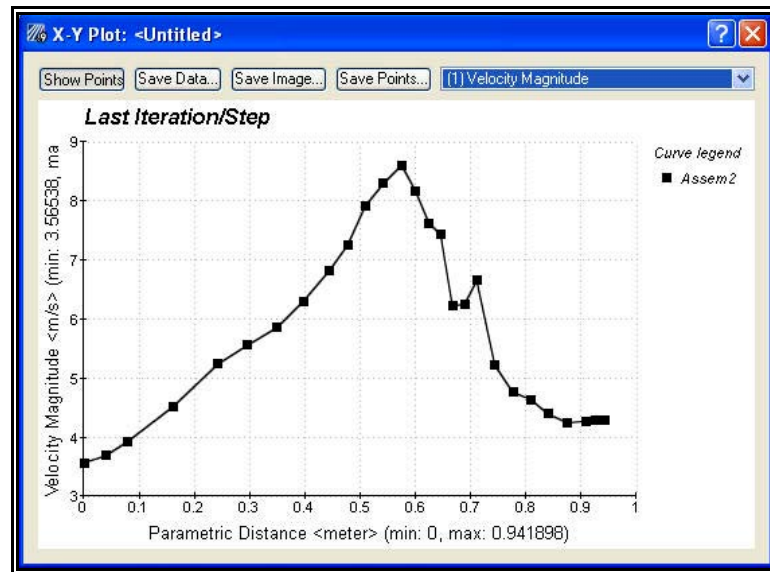
รูปที่ 3.27 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 30 องศา

#### 3.9.3.2 กราฟโปรไฟล์แสดงผลความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 40 องศา



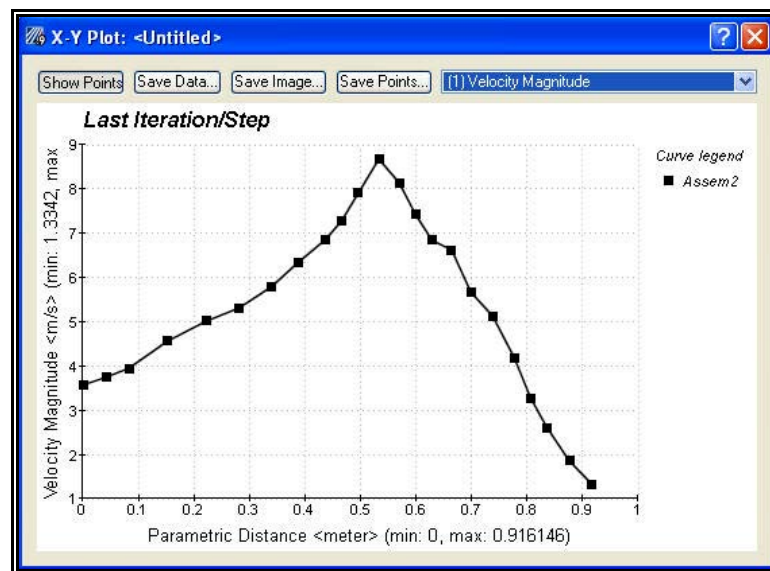
รูปที่ 3.28 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 40 องศา

### 3.9.3.3 กราฟโปรไฟล์แสดงผลความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 50 องศา



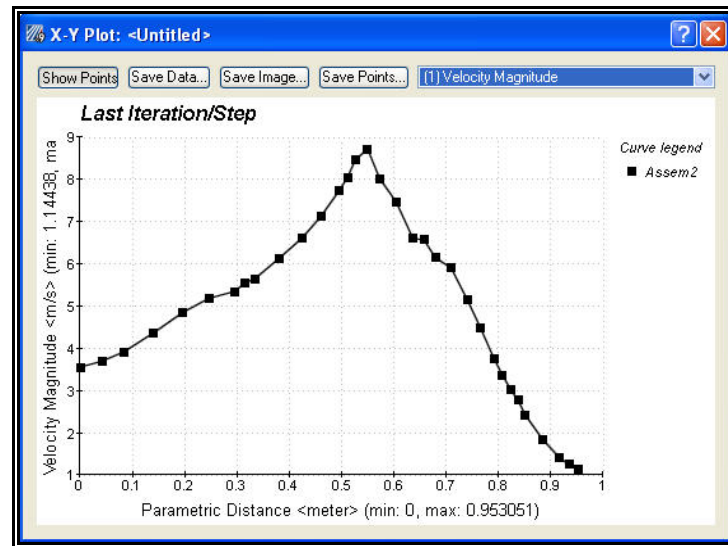
รูปที่ 3.29 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 50 องศา

### 3.9.3.4 กราฟโปรไฟล์แสดงผลความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 60 องศา



รูปที่ 3.30 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 60 องศา

### 3.9.3.5 กราฟโปรไฟล์แสดงผลความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 70 องศา



รูปที่ 3.31 โปรไฟล์ความเร็วการไหลของน้ำที่มุม 70 องศา

### 3.9.4 สรุปการจำลองการไหลในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ปรับมุมองศาของหัวฉีดน้ำ

จากข้อกำหนดการออกแบบกังหันน้ำ กำหนดให้มีความสูงของหัวน้ำ 4 เมตรน้ำ สร้างโวลูตน้ำที่มุมองศาของหัวฉีดแตกต่างกัน 5 มุม คือ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา และมีความเร็วลำนํ้าคิดที่ระดับความสูงของหัวน้ำ 9 เมตรต่อวินาที หลังจากคำนวณผลพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม CFXdesign ปรากฏว่าที่มุม 60 องศาโวลูต จะให้ค่าแรงบิดและความเร็วรอบการหมุนที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับมุมองศาโวลูตอื่นๆ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลได้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณพลศาสตร์ของไหลของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มุมองศาโวลูตที่แตกต่างกัน (CFD)

กรณีการปรับมุมองศา	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	กำลังงาน		แรงยกตัว (นิวตัน-เมตร)	ความดันสถิต (ปาสคาล)
			วัตต์	แรงม้า		
มุม 30 องศา	230	8.21	198	0.26	184	1.8e+05
มุม 40 องศา	232	9.05	220	0.29	193	2.0e+05
มุม 50 องศา	254	9.76	260	0.34	218	2.2e+05
มุม 60 องศา	310	15.15	490	0.65	147	1.3e+05
มุม 70 องศา	309	10.76	348	0.46	306	2.7e+05

จากผลเฉลยในรูปแบบต่างๆ ที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเป็นข้อมูลหลักที่ใช้เป็นตัวแปรในพัฒนากังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กต่อไป และข้อมูลที่ได้นี้ยังส่งผลให้เป็นตัวแปรหลักในการวิเคราะห์ผลเพื่อหาประสิทธิภาพในการทำงานของระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ในการเปรียบเทียบผลกับการทดสอบต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นจริง



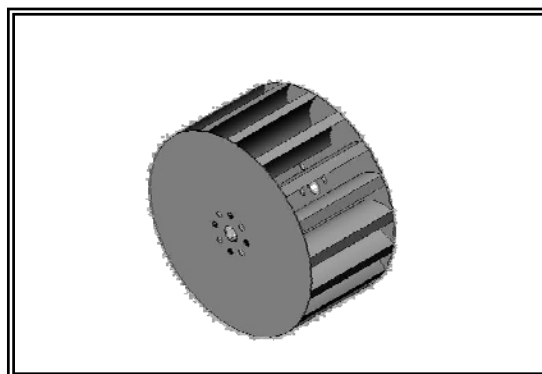
## บทที่ 4

# วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างต้นแบบกังหันน้ำและวิธีดำเนินการ สร้างต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

เนื้อหาในบทนี้จะแสดงวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีโครงสร้างที่จำเป็นต้องคำนึงถึงเพราะต้องรับน้ำหนักน้ำที่มีขนาดบรรจุ 1000 ลิตรที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะเหตุนี้วัสดุจึงต้องมีคุณภาพดีแข็งแรง ราคาถูกและสามารถหาได้ในท้องตลาด แต่ก็ยังมีอุปกรณ์หรือวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนอื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้วัสดุหรืออุปกรณ์ที่พิเศษไม่สามารถหาได้หรือผลิตได้ในประเทศก็จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ สามารถจำแนกวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กได้ดังนี้

## 4.1 กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

### 4.1.1 ล้อกังหันน้ำ



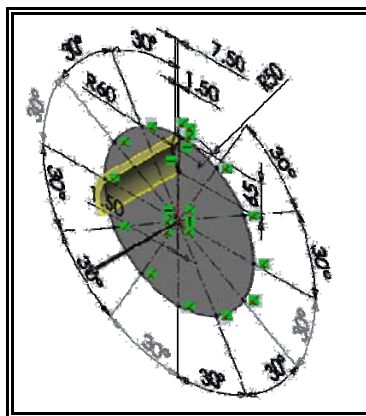
รูปที่ 4.1 ล้อกังหันน้ำ

ล้อกังหันน้ำทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง และ ยึดหยุ่นสูงในตัว เพราะล้อกังหันน้ำต้องมีน้ำหนักเบาซึ่ง จะทำให้ช่วยในการเริ่มหมุนได้ง่าย ดังนั้น ล้อกังหันน้ำจึงเป็นหัวใจหลักของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก วัสดุที่ใช้ทำล้อกังหันน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า จึงเป็นหัวใจหลัก และ สำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งล้อกังหันน้ำทำจากวัสดุ

#### 4.1.1.1 ขั้นตอนการสร้างล้อยก้นน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

การสร้างล้อยก้นน้ำ จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงมุมพิชของใบและมุมลำนน้ำที่จะเข้าสู่หน้าตัดล้อยก้นน้ำเป็นหลัก โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบทางด้านวิศวกรรม เพื่อให้ขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุด โดยทำการแบ่งขั้นตอนการสร้างดังนี้

1. ทำการสร้างต้นแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณออกแบบรูปทรงต่างๆ ที่จำเป็นเบื้องต้น ดังรูปที่ 4.2
2. ทำการสกัดแบบลงบนกระดาษวงกลมที่มีขนาด 310 มิลลิเมตร ตามขนาดที่ออกแบบไว้ด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อนำ Layout ที่ได้มาทาบเพื่อตัดเหล็กและวางมุมมองสาและตำแหน่งของใบ
3. นำแบบสกัดมาทำการทาบเหล็กเพื่อทำการเจาะรู
4. ทำการนำใบยก้นน้ำ มาเชื่อมขึ้นรูป
5. นำใบยก้นน้ำมาทำการเชื่อม ตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการเชื่อมขึ้นรูป

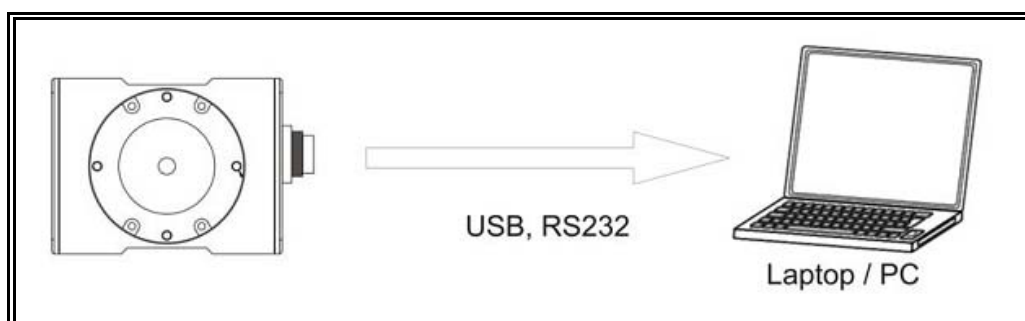
#### 4.1.2 อุปกรณ์วัดค่าโปรไฟล์การไหลและแรงบิด (Torque Transducer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ต่อเข้ากับเพลาล้อกังหันน้ำและชุดอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า (Generator) มีหน้าที่วัดค่าความเร็วรอบการหมุนและค่าพลังงานไฟฟ้าขณะที่เครื่องกำลังทำงาน เพื่อวัดค่าโปรไฟล์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์วัดค่าโปรไฟล์การไหลและแรงบิด (Torque Transducer)

ทอร์ค ทรานสดิวเซอร์ นั้นมีความสำคัญต่องานวิจัย และพัฒนาระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์หลัก ในการวัดระบบการทำงานในรูปแบบโปรไฟล์การทำงานที่แสดงผลในรูปแบบของกราฟ การวัดผลค่าแรงบิดใช้งานแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ ทอร์ค ทรานสดิวเซอร์ ยังใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ในระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า อุปกรณ์นี้ จึงเป็นตัวแปรสำคัญในระบบการทำงานของกังหันน้ำ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบการทำงานต่างๆ ที่เกิดขึ้น และใช้เป็นเครื่องมือ ในการพัฒนาและแก้ไขระบบ ให้สามารถทำงานตามข้อกำหนดในการออกแบบต่อไป

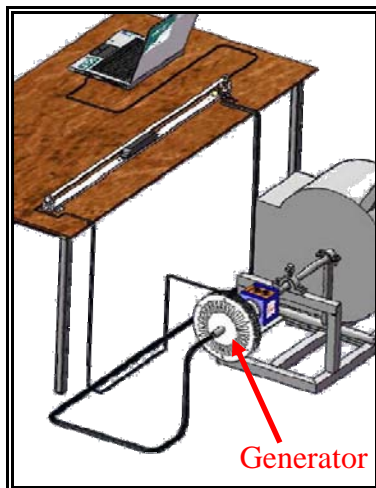


รูปที่ 4.5 การต่อ ทอร์ค ทรานสดิวเซอร์ ที่ต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์



#### 4.1.4 อุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานกลจากการหมุนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ติดตั้งไว้ที่เพลาล้อกังหันน้ำดังรูปที่ 4.8 (ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) ตำแหน่งการวาง Generator (ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า Generator

#### 4.1.5 โวลูตน้ำ (Volute)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ครอบล้อมกันหันน้ำ มีความสำคัญมากในระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ที่สำคัญคือ ส่วนที่ใช้ครอบล้อม และส่วนที่เป็นช่องทางน้ำเข้าล้อมกังหันน้ำ (เจ็ทน้ำ) ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 โวลูตน้ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) ท่อเจ้ท่้ำ (ข) ท่อเจ้ท่้ำด้านทางเข้าใบพัด (Top View)

#### 4.1.6 บอลวาล์ว (Ball Valve)

ใช้เป็นอุปกรณ์ในการปรับระดับอัตราการไหลของน้ำ ที่จะไหลเข้าสู่หน้าตัดล้อยกั้นน้ำ เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4.11 บอลวาล์ว (Ball Valve)

## 4.2 การออกแบบโครงสร้างหลักและดำเนินการสร้าง

โครงสร้างของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก จำเป็นที่จะต้องออกแบบเบื้องต้นก่อนทำการสร้างต้นแบบ เพราะโครงสร้างจำเป็นต้องมีการรับน้ำหนักน้ำขนาด 1000 ลิตร หรือประมาณ 9,810 นิวตัน ซึ่งมีน้ำหนักมาก จึงต้องออกแบบเพื่อให้โครงสร้างของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถที่จะรับน้ำหนักนี้ได้ ขั้นตอนในการออกแบบและการดำเนินการสร้างต้นแบบ สามารถจำแนกได้ดังนี้

### 4.2.1 ทำการออกแบบและเขียนแบบ

ขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบและเขียนแบบโครงสร้าง โปรแกรมที่ใช้ในการเขียนแบบคือ โปรแกรม Solid works ข้อมูลที่ใช้ในการเขียนแบบ เสาปูนอัดแรงแบบฐานแผ่กระจาย 4 ฐาน ต้องการ



#### 4.2.2 ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเบื้องต้น

หลังจากออกแบบและเขียนแบบ โครงสร้างหลักของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก จำเป็นต้องวิเคราะห์โครงสร้าง ว่าสามารถรับน้ำหนักของน้ำขนาด 1000 ลิตรได้ตามที่ออกแบบไปหรือไม่ การทดสอบโครงสร้างเสา คาน จะใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรม Ansys โดยทำการกำหนดแรงกระทำ (Load) ที่กระทำต่อคานและเสา กำหนดจุดจับยึด และ กำหนดวัสดุที่ใช้เบื้องต้นโดยเลือกน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ให้มีขนาดใกล้เคียงกับวัสดุจริงมากที่สุด ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถทำนายโครงสร้างกังหันน้ำเบื้องต้นได้ว่าจะใช้วัสดุอะไรเป็นตัวสร้างต้นแบบ เพราะการวิเคราะห์เราจะต้องทำการเลือกวัสดุในการวิเคราะห์ผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย โปรแกรมจะเป็นตัวเชื่อมโยงวัสดุนั้นไว้ให้ใช้ โดยสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ผลทางวิศวกรรมได้



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์โครงสร้างทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.13 รูปต้นแบบกังหันน้ำขนาดเล็กและการออกแบบ



รูปที่ 4.14 การวางท่อ



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบรวมของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก



## บทที่ 5

# การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของกังหันน้ำ และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการทดสอบระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบต้นแบบกังหันน้ำ มาทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากโปรแกรมช่วยในการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล CFX Design V9 เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบ โครงสร้าง และใบกังหันน้ำขนาดเล็กต่อไป

จากการทำการวิจัยเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

### 5.1 กรณีการศึกษาที่ 1

เป็นการศึกษาผลการทดสอบในส่วนของแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้โปรแกรม CFX Design V9 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ให้การยอมรับในหมู่นักวิจัยทั่วโลก มาทำการจำลองสนามการไหลของโปรไฟล์การไหลของน้ำ ในรูปแบบความดันสถิต ความเร็วในแนวแกนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบการทำงาน ผลการทดสอบการใช้โปรแกรมเพื่อทำการคำนวณหามุมอัตราการไหลที่ดีที่สุดเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลได้มาทำการสร้างโมเดลน้ำ เพื่อสร้างเป็นต้นแบบที่ใช้สำหรับการทดสอบจริง ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ที่มุมเจ็ทน้ำ 60 องศาให้อัตราการไหลที่ดีที่สุดและสามารถผลิตแรงบิดใช้งานได้มากที่สุด เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับมุมเจ็ทน้ำที่มุม 30, 40, 50, และ 70 องศา จากมุมเจ็ทน้ำ 60 องศาที่ทำการวิเคราะห์ผล ได้ค่าความเร็วรอบการหมุน 310 รอบต่อวินาที และได้แรงบิดใช้งานเท่ากับ 15.15 นิวตันเมตร ที่รอบการคำนวณ 100 รอบการคำนวณ (Iteration)

### 5.2 กรณีการศึกษาที่ 2

เป็นการศึกษาผลการทดสอบต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ระดับความสูงของหัวน้ำ 4 เมตร การทดสอบกังหันน้ำ ทำได้โดยการปล่อยน้ำในถังเก็บน้ำลงมาโดยอาศัยบอลลูนเป็นตัวปรับระดับอัตราการไหล บอลลูนตัวนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว หรือประมาณ 127 มิลลิเมตร ปล่อยน้ำผ่านท่อพีวีซีลงมายังหน้าตัดเจ็ทน้ำที่มีพื้นที่ 0.0108 ตารางเมตร เพื่อเพิ่มความแรงของลำน้ำที่ไหลลงมาด้วยความเร็ว 9 เมตรต่อวินาที เข้าสู่หน้าตัดล้อยกังหันน้ำเพื่อให้อัตราการไหลนั้นเกิดการหมุนเพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยเพลเป็นตัวส่งกำลังมาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กยังมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการวัดค่าโปรไฟล์การไหลที่เกิดขึ้นในระบบการทำงาน เรียกว่า ทอร์ค ทรานสดิวเซอร์ ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับวัดค่าความเร็ว



รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่อทรานสดิวเซอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์

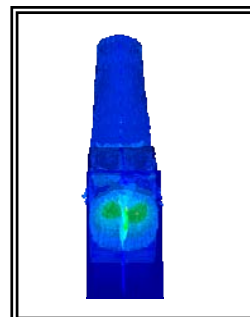
การทดสอบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยทำการต่อ Resister เข้ากับระบบการทำงานของกังหันน้ำ ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การต่อ Resister เข้ากับระบบการทำงาน



(ก)



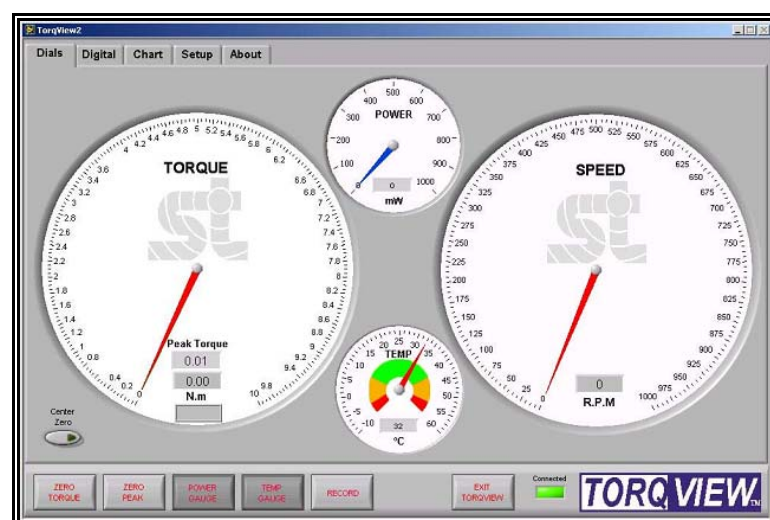
(ข)

รูปที่ 5.3 (ก) การทดสอบต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก  
(ข) การทดสอบโดยใช้โปรแกรม CFdesign V9

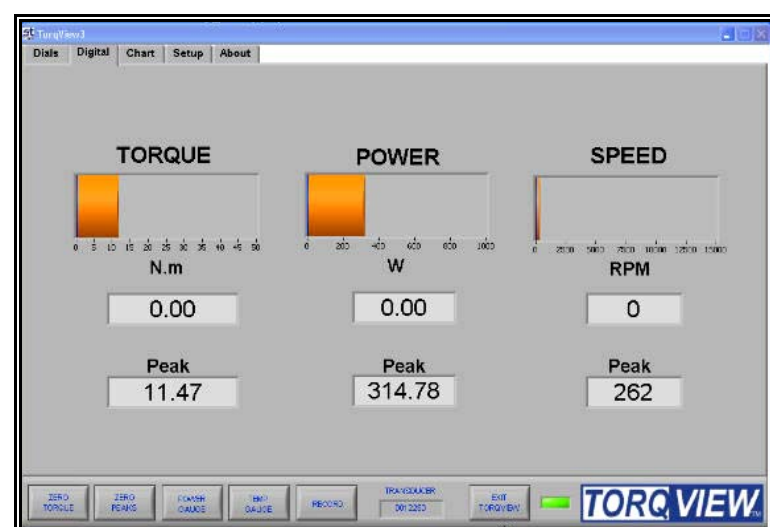
การทดสอบ จะทำการแบ่ง การทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบโดยใช้ Resister กับ การทดสอบโดยใช้แผงหลอดไฟจำนวน 8 หลอด ซึ่งหลอดไฟแต่ละหลอดจะมีขนาด 25 วัตต์

### 5.2.1 การทดสอบส่วนที่ 1

หลังจากทำการต่อ Resister เข้ากับระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแล้ว และทำการทดสอบระบบการทำงานเบื้องต้น และทำการวัดค่าความเร็วรอบการหมุน แรงบิดใช้งาน และพลังงานทางไฟฟ้าที่จะได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทอร์ค ทรานสดิวเซอร์ ที่ต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.5 ซึ่งได้ค่าความเร็วรอบการหมุนประมาณ 262 รอบต่อนาที แรงบิดประมาณ 11.47 นิวตันเมตร พลังงานไฟฟ้าที่ได้ประมาณ 314.78 วัตต์



รูปที่ 5.4 หน้าต่างของโปรแกรม Torque View



รูปที่ 5.5 หน้าต่างของโปรแกรมหลังทำการทดสอบ

### 5.2.2 การทดสอบส่วนที่ 2

เป็นการทดสอบโดยใช้หลอดไฟซึ่งมีขนาดหลอดเท่ากับ 25 วัตต์ จำนวน 8 ดวง มาทำการทดสอบโดยทำการต่อเข้ากับแผงวงจรไฟฟ้าแบบขนาน ดังรูปที่ 5.6 และทำการต่อแผงวงจรไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า (Generator) ดังรูปที่ 5.7

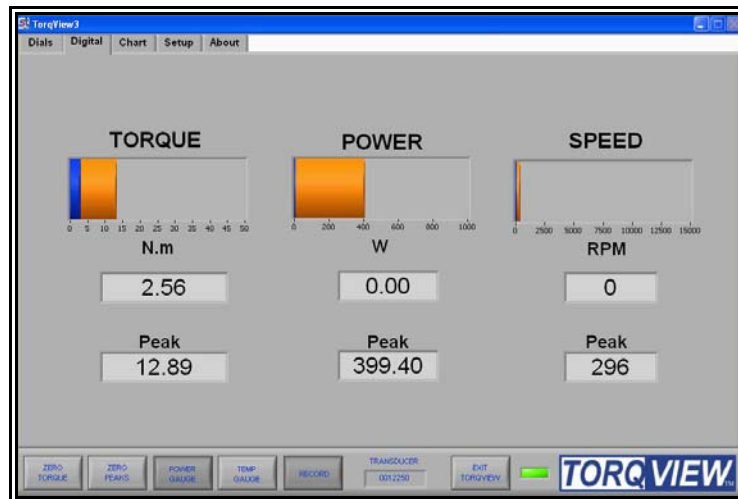


รูปที่ 5.6 ชุดแผงวงจรไฟฟ้าที่ใช้เป็นภาระโหลดในการทดสอบกังหันน้ำ



รูปที่ 5.7 องค์ประกอบของระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

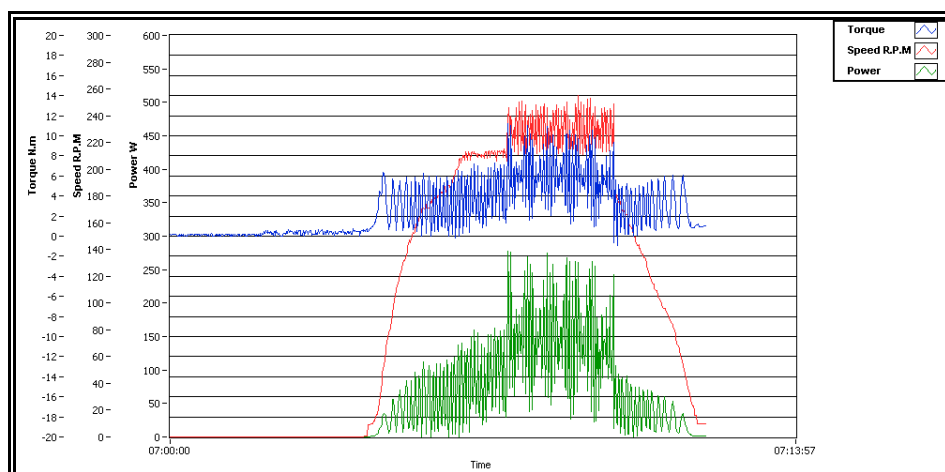
หลังจากทำการเชื่อมต่อระบบการทำงานต่างๆ เข้าด้วยกัน และทำการทดสอบระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ทำการวัดค่าความเร็วรอบการหมุน แรงบิดใช้งาน และพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (เทอร์ค ทรานสดิวเซอร์) ที่ต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.8 ซึ่งได้ค่าความเร็วรอบการหมุนประมาณ 296 รอบต่อนาที แรงบิดประมาณ 12.89 นิวตันเมตร พลังงานไฟฟ้าที่ได้ประมาณ 399.40 วัตต์



รูปที่ 5.8 หน้าต่างของโปรแกรมหลังทำการทดสอบ โดยใช้แผงหลอดไฟ



รูปที่ 5.9 การทำงานของภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 5.10 โปรไฟล์การไหลด้วย ทอร์ค ทรานสดิวเซอร์ การทดสอบโดยใช้แผงหลอดไฟ

จากผลการทดสอบการทำงานของระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่สภาวะการทำงานจริง ในลักษณะการทดสอบต่างๆ ที่เกิดขึ้น กับ การทดสอบการทำงาน โดยทำการต่อ Resister กับ การต่อ โดยใช้แผงวงจรไฟฟ้า พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้ต่างกัน 21 เปอร์เซ็นต์ ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจริง

### 5.3 การวิเคราะห์การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (Head Loss Due to Friction)

ในการศึกษาการไหลของน้ำที่ไหลออกจากถังกักเก็บน้ำผ่านอุปกรณ์ประกอบต่อต่างๆ ในระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งประกอบไปด้วย บอลวาล์ว และข้องอ 60 องศา การศึกษาได้ทำการเชื่อมต่อท่อพีวีซีเข้ากับบอลวาล์ว และข้องอ 60 องศา เพื่อเชื่อมโยงกับโวลูตน้ำของกังหันน้ำ ซึ่งสภาพการไหลของน้ำผ่านอุปกรณ์ประกอบต่อต่างๆ ย่อมเกิดการสูญเสียขึ้นได้ การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์การสูญเสียออกเป็น 2 ส่วน คือ การสูญเสียหลัก และ การสูญเสียรอง

#### 5.3.1 การสูญเสียหลัก (Major Loss)

การศึกษาค้นคว้าได้ทำการปล่อยน้ำจากถังกักเก็บน้ำให้ไหลผ่านท่อพีวีซี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 127 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วลำนํ้า 9 เมตรต่อวินาที เป็นความเร็วลำนํ้าที่ยังไม่ได้คิดอัตราการสูญเสีย

∴ หาค่า  $N_R$  ก่อนเพื่อหาค่า  $f$  เมื่อค่า  $f$  คือ ค่าแฟคเตอร์ของความเสียดทาน

จากสมการ

$$\begin{aligned} N_R &= \frac{\rho D v}{\mu} \\ &= \frac{1000 \text{ kg} / \text{m}^3 \times 0.127 \text{ m} \times 9 \text{ m} / \text{s}}{0.001003 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 1,139,581 > 2,000 \\ &= 1,139,581 \quad \text{เป็นการไหลแบบปั่นป่วน} \end{aligned}$$

เนื่องจากเป็นการไหลแบบปั่นป่วน หาค่า  $f$  โดยใช้ Moody Diagram ดังรูปที่ 2.16

จากตารางที่ 2.3 ได้  $\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{127 \text{ mm}} = 0.000012$$

จาก Moody Diagram ที่  $N_R = 1,139,581$  และ  $\frac{\varepsilon}{D} = 0.000012$  จะได้ค่าแฟคเตอร์ของความเสียดทาน  $f = 0.0185$

คำนวณหาค่าความเร็วลำนํ้าที่ตำแหน่งการไหลที่จุดที่ 2 โดยอาศัยความต่างของระดับ ของระดับ น้ำอ้างอิงมาทำการคำนวณ ดังรูปที่ 5.11

จากสมการเบอร์นูลลี  $\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$

เมื่อ  $\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} = 0$  เพราะถึงน้ำเปิดสู่บรรยากาศ

$\frac{v_1^2}{2g} = 0$  เพราะระดับผิวน้ำด้านบนไม่มีความเร็วในการไหล

$\frac{v_2^2}{2g} = Z_1 - Z_2 = 4\text{ m} - 3.5\text{ m} = 0.5\text{ m}$

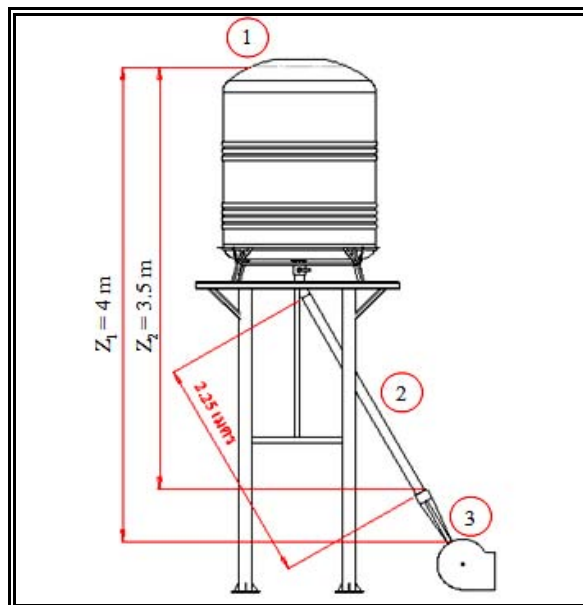
$v_2 = \sqrt{0.5\text{ m} \times 2 \times 9.81\text{ m/s}^2} = 3.1\text{ m/s}$

เลือกใช้  $3\text{ m/s}$  ในการคำนวณ

จากสมการ  $h_L = f \frac{Lv^2}{D2g}$

$$= \frac{0.0185 \times 2\text{ m} \times 3^2\text{ m/s}}{0.127\text{ m} \times 2 \times 9.81\text{ m/s}^2} = 0.1\text{ m}$$

$\therefore h_L = 0.1\text{ m}$



รูปที่ 5.11 ใช้ในการคำนวณหาความเร็วน้ำที่ตำแหน่งการไหลในระดับน้ำต่าง ๆ

### 5.3.2 การสูญเสียรอง (Minor Loss)

ระบบท่อส่งน้ำของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมีอุปกรณ์ที่สำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานอยู่ 4 จุดต่อ คือการสูญเสียที่ทางเข้า การสูญเสียที่บอวลวาล์ว การสูญเสียที่ข้องอ 60 องศา การสูญเสียที่ทางออก สามารถจำแนกค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองได้ดังนี้

- |                               |              |              |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| 1) การสูญเสียที่ทางเข้า       | $K_1 = 0.05$ | รูปที่ 2.18  |
| 2) การสูญเสียที่บอวลวาล์ว     | $K_2 = 0.05$ | ตารางที่ 2.4 |
| 3) การสูญเสียที่ข้องอ 60 องศา | $K_3 = 0.01$ | รูปที่ 2.21  |
| 4) การสูญเสียที่ทางออก        | $K_4 = 1$    | รูปที่ 2.20  |

จากสมการ 
$$h_m = k \frac{v^2}{2g}$$

จะได้ 
$$h_m = (0.05 + 0.05 + 0.01 + 1) \frac{3m/s^2}{2 \times 9.81m/s^2} = 0.5m$$

$$\therefore h_m = 0.5m$$

### 5.3.3 การคำนวณหาความเร็วน้ำจริงที่ออกจากหัวฉีด

การคำนวณหาความเร็วลำน้ำที่ออกจากหัวฉีดจริง จำเป็นที่จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของการสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น การสูญเสียหลัก และการสูญเสียรอง เพื่อให้ได้ค่าความเร็วลำน้ำที่ถูกต้องที่คิดจากอัตราการสูญเสียแล้ว

พิจารณาดำแหน่งที่ 1 กับตำแหน่งที่ 3 ให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่ 3 เขียนสมการเบอร์นูลลีได้ดังนี้

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + Z_3 + h_{Loss} + h_m$$

เมื่อ  $\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_3}{\gamma} = 0$  เพราะถึงน้ำเปิดสู่บรรยากาศ

$\frac{v_1^2}{2g} = 0$  เพราะระดับผิวน้ำด้านบนไม่มี ความเร็วในการไหล

$Z_1 = 4$  เมตร  $Z_3 = 0$  เพราะอยู่ที่จุดอ้างอิง

$h_{Loss} = 0.1$  เมตร

$h_m = 0.5$  เมตร

แทนค่าลงในสมการ  $0 + 0 + 4m = 0 + \frac{v_3^2}{2 \times 9.81m/s^2} + 0 + 0.1m + 0.5m$

$$v_3 = \sqrt{4 - (0.1 + 0.5)m \times 19.62m/s^2}$$

$$v_3 = 8.16m/s$$

$\therefore$  จะได้ค่าความเร็วลำน้ำที่ออกจากหัวฉีดจริงเท่ากับ  $8m/s$

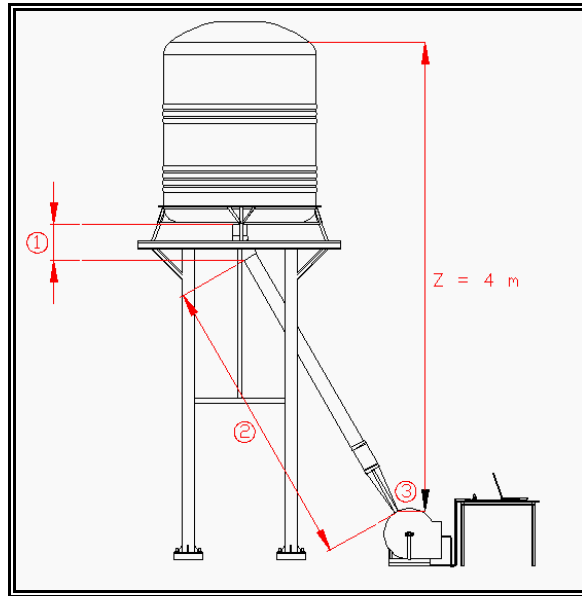


### 5.3.4 คำนวณหาความดันและการสูญเสียที่หัวฉีด (Nozzle)

จากสมการเบอร์นูลลี

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + Z_3 + h_{Loss}$$

พิจารณา ① และ ③ ให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่ ③ ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ใช้ในการคำนวณหาความดันและการสูญเสียที่หัวฉีด (Nozzle)

$$\frac{p_1}{\gamma} = 0 \quad \text{เพราะถึงน้ำเปิดสู่บรรยากาศ}$$

$$\frac{p_3}{\gamma} = 0 \quad \text{เพราะว่าทางออกของน้ำเปิดสู่บรรยากาศ}$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = 0 \quad \text{เพราะระดับผิวน้ำด้านบนไม่มีความเร็วในการไหล}$$

$h_{Loss} = 0.1$  เมตร ,  $h_{Minor} = 0.5$  เมตร,  $Z_1 = 4$  เมตร,  $Z_3 = 0$  เพราะอยู่ที่ระดับอ้างอิง

พิจารณา ② กับ ③ ให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่ ③

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + Z_3 + h_{Loss} + h_{Minor}$$

$$\frac{p_3}{\gamma} = -Z_3 + Z_2 + h_{Loss} + h_{Minor}$$

$$= 0 + 0 + 0.1 + 0.5 \text{ m}$$

$$p_3 = \gamma_3 \times 0.6 \text{ เมตร}$$

$$\text{เมื่อ } \gamma = \rho g \text{ จะได้ } p_3 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.6 \text{ m}$$

$$p_3 = 5,886 \text{ Pa หรือ } (N/m^2) \text{ ค่าความดันทางออกของหัวฉีด}$$

คำนวณหาเสื่อน้ำจริงหลังคิดอัตราการสูญเสียแล้ว

$$\text{จากสมการ } h_{net} = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{net} = \frac{5,886 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} + \frac{8^2 \text{ m}}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{net} = 0.6 \text{ m} + 3.26 \text{ m} = 3.86 \text{ เมตร}$$

ค่าความเร็วที่ออกจากหัวฉีด  $v_j$  หาได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ จะได้ค่า  $v_j$  เฉลี่ยเท่ากับ 8.16 เมตรต่อวินาที เลือกใช้ที่ 8 เมตรต่อวินาที

∴  $C_v$  สามารถคำนวณค่าได้จากอัตราส่วนระหว่างความเร็วจริงที่ออกจากหัวฉีดจากความเร็วที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการจะได้ } C_v &= \frac{8 \text{ m/s}}{\sqrt{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 4 \text{ m}}} \\ &= 0.96 \end{aligned}$$

ในการศึกษาได้ค่าอัตราส่วนความเร็ว  $C_v = 0.96$

$$\text{จากสมการ } h_{L_{nozzle}} = \left( \frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \left( \frac{v_j^2}{2g} \right)$$

$$h_{L_{nozzle}} = \left( \frac{1}{0.96^2} - 1 \right) \left( \frac{8^2 \text{ m}}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right)$$

$$\therefore \text{จะได้เสื่อน้ำที่หัวฉีด (Nozzle) } = 0.26 \text{ เมตร}$$

### 5.3.5 การคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกังหันน้ำ

การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทางทฤษฎีจำเป็นที่จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของระดับความสูงของหัวน้ำด้านบนและด้านล่างที่ระดับอ้างอิง 4 เมตรน้ำ อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบท่อ  $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$  ซึ่งจะพิจารณาว่าของไหลจะไหลผ่านพื้นที่ทั้งหมดทุกๆ ความยาวท่อผ่านหัวฉีดไปยังล้อกังหันน้ำที่ติดตั้งอยู่กับระบบท่อจนไหลออกสู่บรรยากาศ เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำจะ

$$Q = AL$$

$$0.1 \text{ m}$$

$$0.5 \text{ m}$$

$$0.26 \text{ m}$$

จากการศึกษาให้พิจารณาระดับความสูงของหัวน้ำด้านบน  $\bigcirc$  ด้านล่างที่ระดับอ้างอิง ② จากสมการเบอร์นูลลี

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + h_T = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_L + h_m$$

$$\text{เมื่อ } \frac{p_1}{\gamma_1} = \frac{p_2}{\gamma_2} = 0 \text{ เพราะว่าเปิดสู่บรรยากาศ และ } Z_1 = 4 \text{ m}$$

$$Z_2 = 0 \text{ m}$$

$$\therefore 100 - h_T = h_L$$

$$h_T = 4 \text{ m} - (0.1 \text{ m} + 0.26 \text{ m} + 0.5 \text{ m}) = 3.14 \text{ เมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } P_T &= Q\gamma h_T \\ &= 0.013 \text{ m}^3 / \text{s} \times 9.81 \text{ kN} / \text{m}^3 \times 3.14 \text{ m} \\ &= 0.40 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 5.3.6 การคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

#### วิธีการหาประสิทธิภาพรวม

การหาประสิทธิภาพรวม  $\eta_{total}$  จะหาจากการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าทางทฤษฎีที่ได้คำนวณอัตราการสูญเสียแล้ว  $p_e$  และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าทางทฤษฎีที่ยังไม่ได้คิดอัตราการสูญเสีย  $p_i$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{total} = \frac{p_e}{p_i}$$

เมื่อ  $p_i = gQh_w$  โดยที่  $h_w$  คือ ความสูงของหัวน้ำที่ได้ทำการออกแบบ

$$\text{จากสมการ } p_i = 9.81 \text{ m} / \text{s}^2 \times 0.013 \text{ m}^3 / \text{s} \times 4 \text{ m}$$

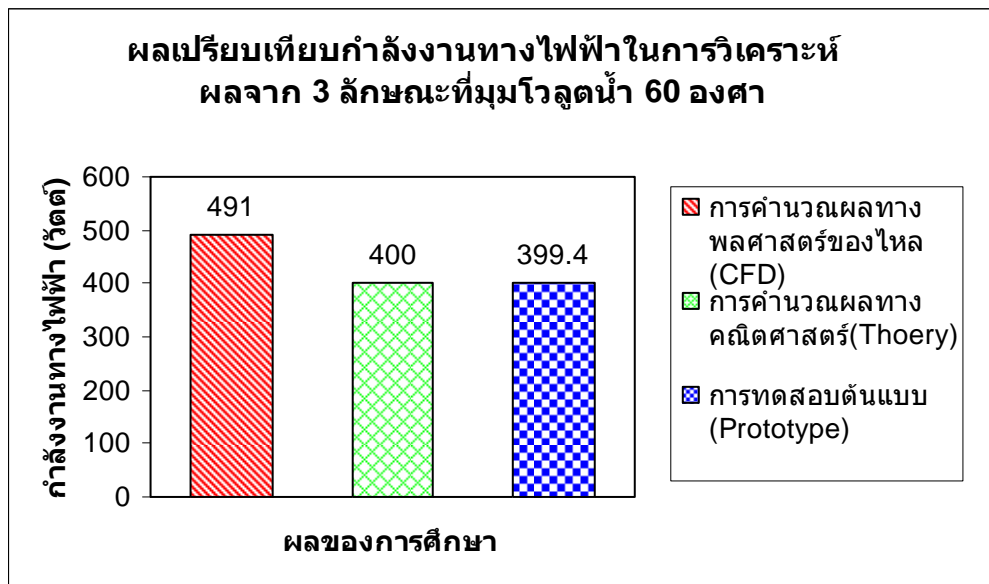
$$\therefore p_i = 0.51 \text{ kW}$$

$$\therefore \text{ประสิทธิภาพรวม } \eta_{Total} = \frac{0.3994 \text{ kW}}{0.51 \text{ kW}} = 0.78$$

$$\therefore 0.78 \times 100 = 78\%$$

### 5.3.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาในส่วนของการคำนวณผลศาสตร์ของไหล การคำนวณผลทางภาคทฤษฎีด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และการทดสอบต้นแบบกั้นน้ำผลิตไฟฟ้าสามารถสรุปผลได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ผลการเปรียบเทียบของค่ากำลังงานทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.13 จะเป็นกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบกำลังงานทางไฟฟ้าในการวิเคราะห์ผลจาก 3 ลักษณะ คือ

1. การคำนวณผลทางด้านพลศาสตร์ของไหล (CFD) ซึ่งได้ค่ากำลังงานทางไฟฟ้าประมาณ 491 วัตต์ ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ยังไม่ได้คิดอัตราการสูญเสียในระบบการทำงาน เช่น การสูญเสียหลัก การสูญเสียรอง เป็นต้น
2. การคำนวณผลทางภาคทฤษฎีโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งคำนวณค่าพลังงานทางไฟฟ้าได้ประมาณ 400 วัตต์ เป็นค่ากำลังงานทางไฟฟ้า ที่ได้จากการคิดอัตราการสูญเสียหลัก การสูญเสียรอง ในระบบการทำงานแล้ว
3. การทดสอบต้นแบบของกั้นน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งได้ค่ากำลังงานทางไฟฟ้าหลังการทดสอบประมาณ 399.4 วัตต์

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุป

จากการศึกษา ได้ทำการค้นคว้าข้อมูล วรรณกรรม ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสำหรับวิเคราะห์ผลของกังหันน้ำโดยวิธีการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อให้เข้าใจรูปแบบการวิเคราะห์ตลอดจนการตั้งสมมุติฐานต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับนำผลข้อมูลและสมมุติฐานที่ได้ มาคำนวณหาค่าตัวแปรเบื้องต้นสำหรับการออกแบบรูปทรงกังหันน้ำและระบบการทำงานของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมในสภาวะการทำงานจริง การออกแบบเริ่มต้นจากการกำหนดรูปทรงโวลูตกังหันน้ำ โดยอาศัยล้อยกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก และกลีบใบกังหันน้ำ เป็นตัวกำหนดสภาวะ และเงื่อนไขของการออกแบบ ทำการปรับมุมมองสาเหตุต่างๆ ให้มุมเจ็ทน้ำมีความแตกต่างกันไปทั้งหมด 5 มุม คือ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา หลังจากทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการออกแบบแล้ว จึงดำเนินการเขียนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม Solid Works เพื่อนำรูปทรงโวลูตและล้อยกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก มาทำการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล ภายใต้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  โมเดล โดยทำการสร้างเมชเอลิเมนต์และทำการปรับค่าแฟคเตอร์เอลิเมนต์ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ลู่เข้าของคำตอบถูกต้องที่สุดตามทฤษฎีให้เป็นไปตามสมการความต่อเนื่อง และสมการนาเวียร์-สโตกส์ เงื่อนไขการลู่เข้าของคำตอบ คือ การป้อนค่าแฟคเตอร์ และเมชเอลิเมนต์ให้กับโวลูตน้ำและล้อยกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กทุกมุมมอง ที่มีค่าแฟคเตอร์ และเมชเอลิเมนต์เท่ากัน เวลาที่ใช้สำหรับการประมวลผลของคำตอบเท่ากัน เพื่อดูผลของคำตอบทุกมุมมองสาเหตุเจ็ทน้ำว่า มุมมองสาเหตุไหนที่ให้ค่าแรงบิดใช้งาน และค่าความเร็วรอบการหมุนมากที่สุด ในสภาวะการจำลองผล ของการทำงานจริงในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

ในส่วนแรก ของการศึกษานี้ ได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั้งทางภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติที่เกี่ยวข้อง กับการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลและการสร้างต้นแบบสำหรับนำข้อมูลและสมมุติฐานที่ได้ มาทำการปรับปรุงแก้ไขรูปแบบการวิเคราะห์เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จากการศึกษพบว่า ในการวิเคราะห์ผลทางด้านพลศาสตร์ของไหล จะถูกแบ่งรูปแบบการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกจะใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ทางด้านของไหล แต่ใช้ได้เฉพาะการวิเคราะห์ที่มีรูปแบบการไหลที่ไม่ซับซ้อนเท่านั้น ส่วนที่สองจะเป็นส่วนที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป มาช่วยในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขที่ไม่สามารถแก้ปัญหาลอยด้วยมือได้ มาอธิบายผลคำตอบให้ง่ายต่อการเข้าใจทั้งรูปแบบผลเฉลย ในรูปแบบความดัน ความเร็ว เป็นต้น

ส่วนที่สอง เป็นการคำนวณหาค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหล ได้คำนวณหาค่าตัวแปรเบื้องต้นด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ มาคำนวณหาความเร็วลำน้ำ พื้นที่การไหลตลอดจนอัตราการไหลและความเร็วรอบการหมุน จากการคำนวณได้ค่าความเร็วลำน้ำประมาณ 8.86 เมตร/วินาที โดยที่ยังไม่คิดอัตราการสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง เมื่อคิดการสูญเสียหลักและการสูญเสียรองแล้ว จึงหาค่าความเร็วลำน้ำได้ประมาณ 8 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลำน้ำที่ไหลออกจากหัวฉีดจริง ที่อัตราการไหลของน้ำประมาณ 0.013 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จากพื้นที่การไหลทั้งหมดทุกระยะความยาวท่อ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วลำน้ำตลอดจนพื้นที่การไหลและอัตราการไหล นำผลการคำนวณที่ได้มาคำนวณหาความเร็วรอบการหมุนเบื้องต้นทางทฤษฎีได้รอบการหมุนประมาณ 280 รอบต่อวินาที ที่อัตราการไหล 0.013 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ในส่วนสาม ได้เริ่มทำการออกแบบรูปทรงโวลูตน้ำและล้อกังหันน้ำตลอดจนโครงสร้างต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง หลังจากนั้นจึงขึ้นส่วนที่ได้ออกแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักสองชิ้นที่จำเป็นในการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหล คือโวลูตน้ำ และล้อกังหันน้ำ มาคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม CFdesign V9 มาคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลทุกมุมมองเสาเจ็ทน้ำ ที่สภาวะเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเดียวกัน พบว่า ที่มุม 60 องศาเจ็ทน้ำ มีอัตราการไหลของน้ำ และให้แรงบิดใช้งานกับความเร็วรอบการหมุน ประมาณ 15 นิวตันเมตร ที่ความเร็วรอบการหมุน 310 รอบต่อวินาที ซึ่งให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับทุกมุมมองเสาและการวิเคราะห์ผลในรูปแบบการแสดงผลอื่นๆ ทั้งอัตราของความดันสถิต การแปรผันในรูปแบบของอัตราการไหล ตลอดจนการสภาวะทำงานต่างๆ ภายในล้อกังหันน้ำ สามารถสรุปการคำนวณได้ว่า ที่มุม 60 องศาเจ็ทน้ำให้ผลการทดสอบทางด้านพลศาสตร์ของไหลดีที่สุด การวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ เป็นแค่การทำนายผลของสภาวะของการทำงานที่ได้จากแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นเท่านั้น การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล ที่ทำการวิเคราะห์จะเป็นจริงได้นั้น จะต้องีผลจากองค์ประกอบอื่นๆ มาทำการเปรียบเทียบกัน จากการศึกษาจึงได้ดำเนินการสร้างต้นแบบและองค์ประกอบของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อใช้เป็นต้นแบบ ในการทดสอบสภาวะการทำงานจริงโดยอาศัยผลการวิเคราะห์ของการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาทำการสร้างโวลูตน้ำที่มุม 60 องศา

ส่วนที่สี่ เป็นการสร้างต้นแบบ และองค์ประกอบต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อใช้สำหรับการทดสอบสถานะการทำงานจริง เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) องค์ประกอบต่างๆ ของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่ใช้ในการทดสอบ จะประกอบไปด้วย ต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ทอร์คทรานสดิวเซอร์ (Torque Transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดโปรไฟล์การไหล และวัดแรงบิดสำหรับใช้ งาน จะใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ โดยทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับทอร์คทรานสดิวเซอร์ ภายใน คอมพิวเตอร์จะประกอบไปด้วยโปรแกรมการทำงานของทอร์คทรานสดิวเซอร์ ซึ่งตัวโปรแกรมที่ใช้ นั้น จะเป็นตัวสำหรับการอ่านค่าที่ได้จากการตรวจวัด และวัดการทำงานต่างๆ ของระบบกังหันน้ำ ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยผ่านตัวทอร์คทรานสดิวเซอร์มายังจอคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นส่วนของการ ประมวลผล การแสดงผลในรูปแบบฮาร์ดโน้ต นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยแผงวงจรไฟฟ้าที่ ประกอบไปด้วยหลอดไฟฟ้าจำนวน 8 หลอด จำนวนวัตต์ของแต่ละหลอดไฟเท่ากับ 50 วัตต์ รวม 400 วัตต์ และการต่อด้วยตัวต้านทานทางไฟฟ้า Resister

ผลการทดสอบต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า จะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะ เป็นการทดสอบการทำงานของกังหัน โดยทำการต่อ Resister เข้ากับระบบการทำงานของกังหันน้ำ พบว่า เมื่อทำการปล่อยน้ำจากถังน้ำที่ความสูง 4 เมตรน้ำ ไหลผ่านมายังท่อที่มีขนาด 127 มิลลิเมตร หรือประมาณ 5 นิ้ว ด้วยอัตราการไหล 0.013 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ลงสู่หัวฉีดของโวลูตน้ำ เข้ามายัง หน้าตัดล้อยกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ทอร์คทรานสดิวเซอร์สามารถวัดค่าความเร็วรอบการหมุนได้ ประมาณ 262 รอบต่อนาที ได้แรงบิดใช้งานสูงสุดประมาณ 11.47 นิวตันเมตร และผลิตกระแสไฟฟ้า ได้ 314.78 วัตต์ ส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบโดยการต่อแผงวงจรไฟฟ้าเข้ากับระบบการทำงานของ กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ทอร์คทรานสดิวเซอร์สามารถวัดค่าความเร็วรอบการหมุนได้ประมาณ 296 รอบต่อนาที ได้แรงบิดใช้งานสูงสุดประมาณ 12.89 นิวตันเมตร และผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 399.4 วัตต์ นำผลการทดสอบที่ได้จากการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาวิเคราะห์และทำการ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากต้นแบบจริง พบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณผลทาง (CFD) มีค่าที่ ใกล้เคียง กับผลของการทดสอบต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากการ ทดสอบประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบสำหรับการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) และ การทดสอบต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ทำให้เข้าใจถึงหลักการ สำหรับการออกแบบ และแนวคิดในการพัฒนารูปแบบ ขององค์ประกอบต่างๆ ในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ในการ ออกแบบตัวรูปทรงโวลูตน้ำ และการออกแบบใบกังหันน้ำ โดยอาศัยโปรแกรมการออกแบบทาง วิศวกรรม มาช่วยในการออกแบบรูปทรงและพื้นผิวต่างๆที่มีความซับซ้อนมาก ทำให้รวดเร็วและ

การใช้โปรแกรม CFdesign V9 มาช่วยในการจำลองสนามการไหล การวิเคราะห์การไหลใน ระบายการทำงานต่างๆ การคำนวณค่าความเร็วรอบการหมุน คำนวณเพื่อหาแรงบิดใช้งาน สิ่งเหล่านี้ จึงทำให้สามารถประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการสร้างอุโมงค์น้ำเพื่อใช้ในการทดสอบ ทำให้ สามารถทำงานวิจัยได้เร็วขึ้น ผลของคำตอบที่ได้จากการศึกษา จะเป็นตัวแปรสำคัญ เพื่อใช้อธิบาย และใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการปรับปรุงและพัฒนากังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กต่อไป

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การเขียนชิ้นส่วนกังหันน้ำ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ของทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ด้วย โปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม ควรกำหนดจุดจับยึดให้กับเส้นสเก็ทโปรไฟล์ที่เขียน เพื่อให้เส้น สเก็ทนั้นเป็นเส้นการเขียนที่ถูกต้อง (Fully Define) โดยทำการบอกขนาดทุกจุดต่อของเส้น

6.2.2 เพื่อให้ได้ผลของคำตอบที่ถูกต้อง และแม่นยำที่สุด ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ด้วยโปรแกรม CFdesign V9 ควรทำการสร้างเมชเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดมากที่สุดใน บริเวณพื้นที่ที่เราต้องการที่จะทราบผลของคำตอบ

6.2.3 ความสูงของหัวน้ำ สามารถกำหนดให้สูงขึ้นได้ เพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำ ก่อนเข้าสู่หน้า ตัดล้อยก้านน้ำ ให้ได้แรงกระทำต่อล้อยก้านน้ำสูงขึ้น เพื่อให้ได้ความเร็วรอบการหมุนของล้อยก้าน น้ำเร็วขึ้น สำหรับการสร้างแรงบิดใช้งานในการผลิตกระแสไฟฟ้า

6.2.4 ควรศึกษาขั้นตอนการออกแบบต่างๆ ทั้งทางภาคทฤษฎี และทางภาคปฏิบัติ ให้มีความ เข้าใจถึงหลักการทำงานของกังหันน้ำ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนา ตัวต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ขนาดเล็กต่อไป



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Barglazan, M., 2001. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier, Netherlands.
- [2] Nilsson, H., Renewable Energy Power for a Sustainable Future. New York : Oxford University Press.
- [3] John, S, Elisia Garcia, Dr. Quamrul Mazumder. (2008). [On-line]. Available [www.umflint.edu/csesp/Documents/Hydro-Turbine-2008.ppt](http://www.umflint.edu/csesp/Documents/Hydro-Turbine-2008.ppt)
- [4] Garcia, E. (2008). University Michigan-flint. [On-line]. Available: <http://www.umflint.edu/csesp/Documents/Hydro-Turbine-2008.ppt>
- [5] Hydro Energy. (2003a). Pelton Turbines. [On-line]. Available: [http://www.hydro-energy.com/\\_bilder/produkte/turbinen/pelton\\_turbine.jpg](http://www.hydro-energy.com/_bilder/produkte/turbinen/pelton_turbine.jpg).
- [6] Mitsubishi Heavy Industries Ltd. (2003). Deraiz2. [On-line]. Available: [http://www.mhi.co.jp/power/e\\_power/topics/2003/img/main43a.gif](http://www.mhi.co.jp/power/e_power/topics/2003/img/main43a.gif).
- [7] Fluent Inc. Fluent 5.0 User's Guide. Lebanon:Centerra Resource Park, Cavendish Court, 1998
- [8] มานิจ ทองประเสริฐ และสมศรี จรุงเรือง. (2526). กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] Arne Kjolle Professor Emeritus December. (2004).  
Norwegian University of Science and Technology, Hydro power in Norway Mechanical Em.
- [10] George F Round 2004 McMaster University. Incompressible flow turbo machines.
- [11] Ristinen, Robert A. & Kraushaar, Jack J. (1999). Energy and the Environment.  
New York : John Wiley & Sons.
- [12] Boyle, G. (1996). Renewable Energy Power for a Sustainable Future. New York : Oxford University Press.
- [13] British Petroleum. (2004). Energy in Focus. [On-line]. Available: <http://www.bp.com/statisticalreview2004>.
- [14] Gatski T.B., "Turbulent Flows: Model Equations and Solution Methodology", in Handbook Of Computational Fluid Mechanics, Edited By Roger Peyret, Academic Press Ltd, (1986), London.
- [15] Kansas Wind Power. (2005). Turgo Turbine. [On-line]. Available: <http://www.kansaswindpower.net/turgo%20top.jpg>.

- [16] Wilcox C.D., "Turbulent Modeling for CFD", DCW Industries, Inc., (1993), California.
- [17] Shepherd, W. & Shepherd, D.W. (1998). Energy Studies. Singapore: World Scientific.
- [18] วัฒนา ถาวร. (2543). โรงต้นกำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [19] "การสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง," [On-line]. Available:  
<http://elearning.spu.ac.th/content/cen371/document/chap%204.9.html>, 2551

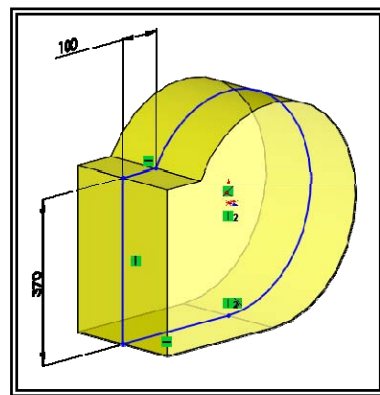
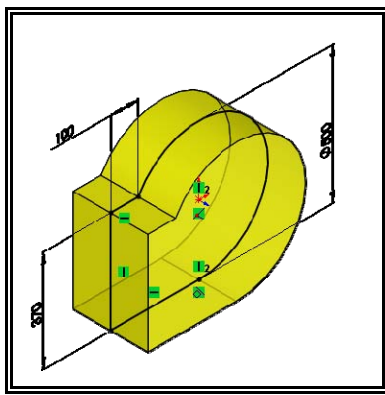
ภาคผนวก ก

แบบงานก่อสร้างโครงสร้างกั้นน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก  
และการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง

## 1. การออกแบบ

### 1.1 การออกแบบโวลูตน้ำ

เริ่มจากการเขียนเส้นโปรไฟล์ขึ้นงาน ให้มีขนาดเป็นสองเท่าของล้อยก้นน้ำ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อเท่ากับ 310 มิลลิเมตร และเส้นโปรไฟล์ที่เขียนนั้น ต้องเป็นเส้นที่ได้ทำการบอกขนาดเพื่อให้เส้นโปรไฟล์เส้นนั้นเป็นเส้นที่มาจากองค์ประกอบเดียวกัน เมื่อทำการเขียนเส้นได้อย่างถูกต้องแล้ว เส้นโปรไฟล์เส้นนั้นจะเป็นสีดำ ซึ่งโปรแกรมจะทำการบอกว่าเส้นนั้นเป็น fully defined ซึ่งเป็นเส้นโปรไฟล์ที่ถูก สามารถใช้งานได้ แต่ถ้าเป็นเส้นโปรไฟล์สีน้ำเงิน จะแสดงเส้นการเขียนที่ยังไม่ถูกต้องเพราะไม่มีจุดจับยึดหรือจุดอ้างอิง โปรแกรมจึงแสดงผลให้เส้นโปรไฟล์เส้นนั้นเป็นสีน้ำเงิน Under defined องค์ประกอบรูปทรงต่างๆแสดงดังรูปที่ ก 1

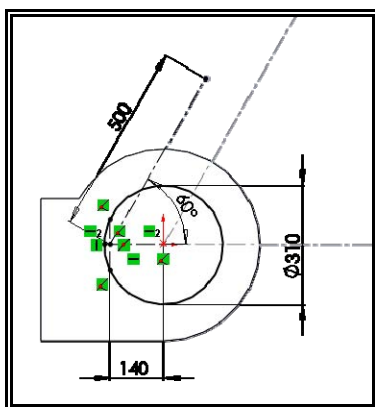


(ก) เส้นโปรไฟล์ที่ถูกต้อง(Fully defined)

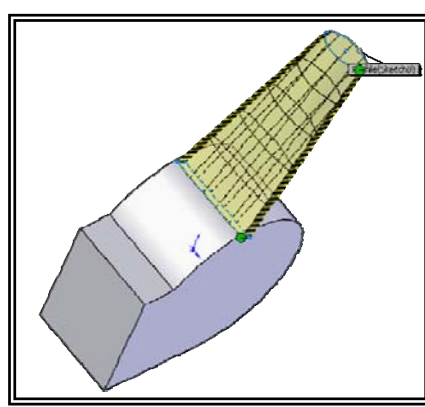
(ข) เส้นโปรไฟล์ที่ไม่ถูกต้อง(Under defined)

รูปที่ ก 1 การออกแบบโวลูตน้ำ

การเขียนเส้นอ้างอิงก็จำเป็นเพราะช่วยทำให้ง่ายต่อการเลือกใช้เครื่องมือต่างๆที่นำมาทำการสร้างท่อลำเจ็ทน้ำ เพราะเส้นอ้างอิงจะเป็นเส้นที่ช่วยในการสร้าง Sketch plan ดังแสดง ในรูปที่ ก 2



(ก) การสร้าง Sketch plan

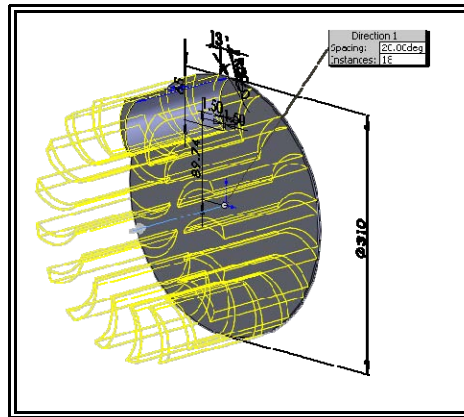


(ข) การสร้างท่อลำเจ็ทน้ำ

รูปที่ ก 2 การออกแบบโวลูตน้ำ

## 1.2 การออกแบบล้อยก้นน้ำ

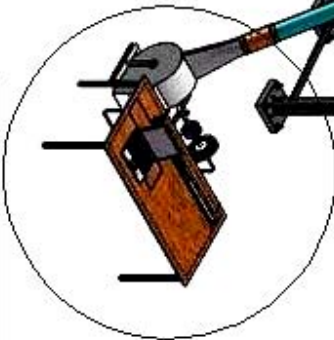
ล้อยก้นน้ำผลิตไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากต่อการสร้างต้นแบบ การออกแบบจึงต้องให้ความสำคัญ เพราะการเขียนชิ้นงานเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ ชิ้นงานนั้นจะต้องมีความถูกต้อง การเลือกใช้เครื่องมือ รวมไปถึงเส้นโปรไฟล์ที่ทำการเขียนด้วย ดังแสดงในรูปที่ ก 3



รูปที่ ก 3 การออกแบบล้อยก้นน้ำ

## 2. แบบโครงสร้าง

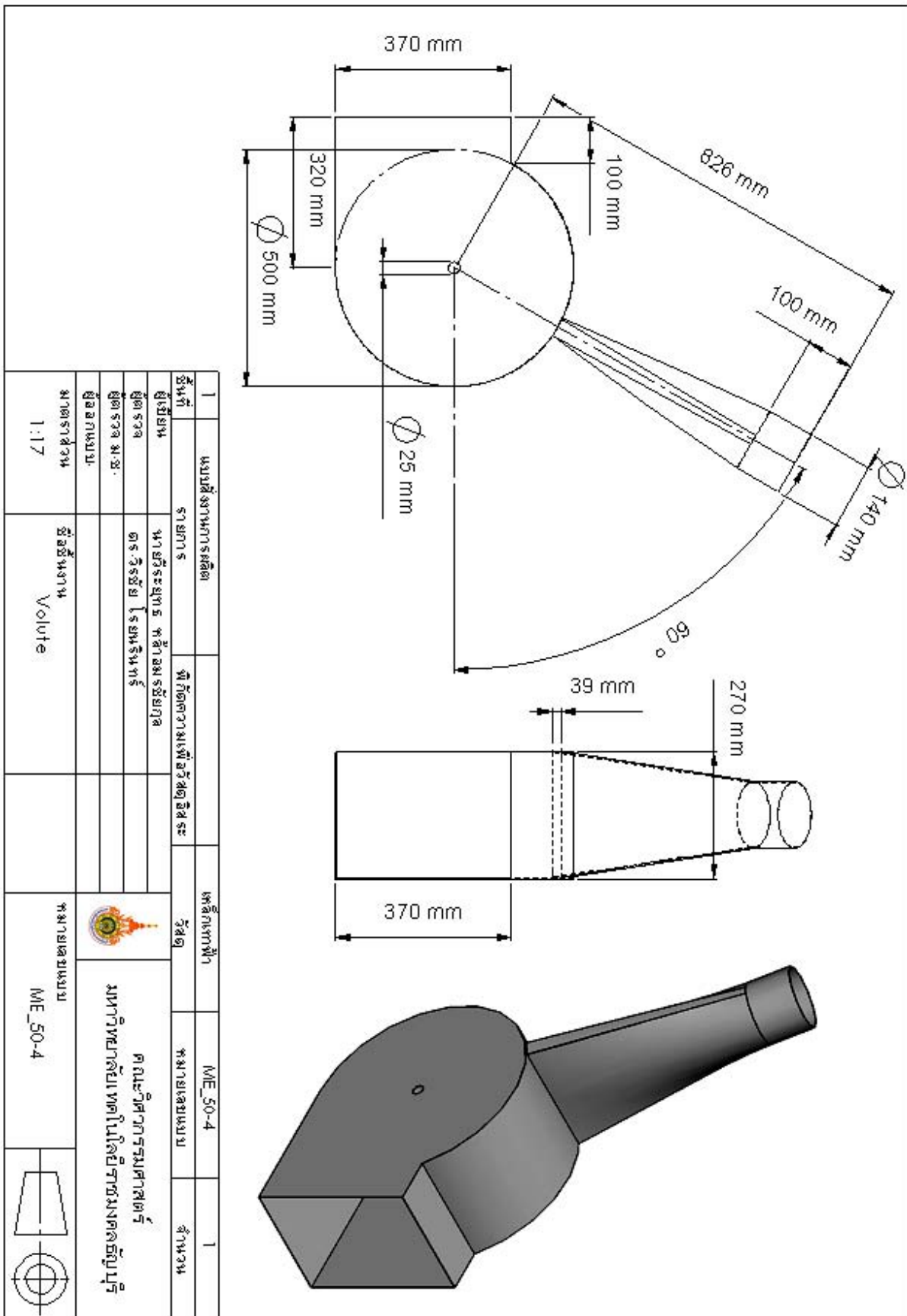
จากที่ได้ทำการคำนวณวิเคราะห์และออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถทำนายผลที่จะเกิดขึ้นได้ ทำให้สามารถมั่นใจได้ว่าโครงสร้างต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไปนั้นสามารถใช้งานได้จริง หลังจากนั้นก็ทำการลอกแบบจากชิ้นงาน เพื่อทำการเขียนแบบสั่งงานการผลิต

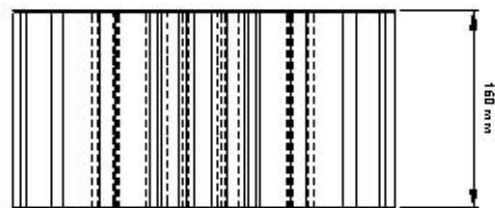












**ภาคผนวก ข**

**ผลทดสอบและวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล  
ภายในกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยโปรแกรม CFdsign V9**

## 1. การคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล

ส่วนโปรแกรม CFdesign เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางงานด้านวิศวกรรมของไหลขั้นสูง ซึ่งอาศัยการคำนวณผลเชิงตัวเลข เทคนิคของการคำนวณนี้เรียกว่า Computational Fluid Dynamics หรือเรียกชื่อย่อว่า “CFD” โปรแกรม CFdesign เป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับมานานในกลุ่มนักวิจัยและวิศวกรด้านของไหลในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายมาก มีเฉพาะในสถานการศึกษาบางแห่งเท่านั้นที่ใช้ทำงานวิจัย

การสร้างชิ้นงานจากโปรแกรม Solid Works 2008 ในระบบ 3 มิติ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลจะต้องอาศัยระบบการจัดการทำงานของ Windows ทำให้ผู้วิจัยหรือนักออกแบบสามารถเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมได้ เพื่อพัฒนาต่อยอดในอนาคตต่อไปได้เอง อีกทั้งการทำงานโดยทำงานผ่านหน้าจอของโปรแกรม Windows จึงทำให้นักวิจัยและผู้ออกแบบมีความคุ้นเคยสามารถควบคุมและป้อนค่าตัวแปรได้ตามต้องการ

โปรแกรม CFdesign เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลถูกแบ่งหน้าที่การทำงานออกเป็นส่วนตามความสามารถและการทำงานของโปรแกรม ได้แก่ การคำนวณผลทางของไหล น้ำ อากาศ แก๊ส และ การคำนวณผลทางด้านความร้อน (Heat Tranter) เป็นต้น

### 1.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ผู้ออกแบบหรือนักวิจัยจะรู้จักวิธีการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) ในนามของการคำนวณผลเชิงตัวเลข (Numerical Method) การแก้สมการต่างๆจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Technique) ที่เขียนจากสมการในสาขาต่างๆ เช่น กลศาสตร์ของไหล กลศาสตร์ของไหลประยุกต์ ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ภาคการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล เป็นต้น การใช้ CFD ในการแก้ไขปัญหา ได้แก่ งานด้านของไหล เช่น การไหลของน้ำในระบบท่อ การไหลของอากาศ ผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เช่น กังหันลม กังหันน้ำ รถยนต์ เป็นต้น

จุดเด่นของวิธีการคำนวณผลด้วย CFD จะถูกใช้เพื่อทำการแก้ปัญหา ตั้งแต่ขอบเขตปัญหาต่างๆ จนถึงปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก นักวิศวกรและนักวิจัยจะใช้ CFD ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการวิเคราะห์ผลเข้าไปในกระบวนการออกแบบ เพิ่มเครื่องมือช่วยในการกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่ใช้ในการคำนวณผล ส่วนชิ้นส่วนที่มีความยุ่งยากมีความซับซ้อนและมีพื้นที่ในการคำนวณเยอะมากอาจจะต้องใช้การคำนวณขั้นสูง ตัวอย่างเช่น การคำนวณระบบระบายความร้อนของโรงงาน เป็นต้น

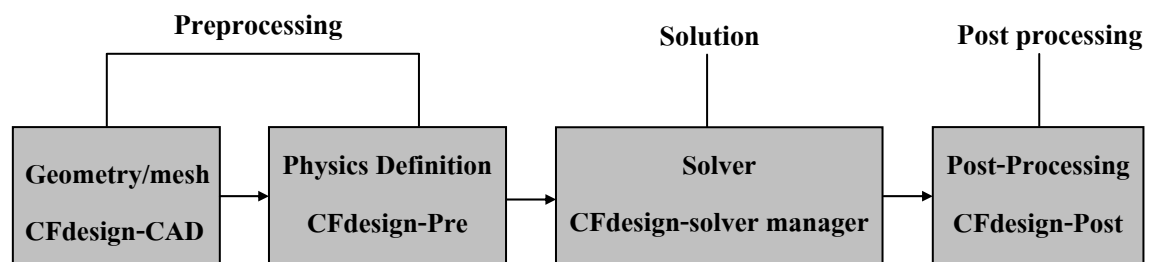
กระบวนการในการวิเคราะห์เริ่มจากการสร้างชิ้นงาน แล้วทำการแบ่งชิ้นงานที่ต้องการคำนวณผลออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ (Meshing) โดยมีรูปทรงง่ายๆ (สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม) เราเรียกชิ้นส่วนเล็กๆนั้นว่า “element (เอลิเมนต์)” และชิ้นส่วนเล็กที่ทำการแบ่งนั้นจะต้องเชื่อมโยงต่อกันทั้งชิ้น

การทำงานโดยการแบ่งเอลิเมนต์ CFD จะทำการแก้สมการโดยการประมาณค่าในแต่ละเอลิเมนต์จนกว่าจะครบทุกชิ้นส่วน แต่ถ้าเป็นชิ้นงานที่ประกอบที่มีชิ้นส่วนในขอบเขตการคำนวณมาก ควรที่จะทำการแบ่งกรุปของชิ้นงานออกเป็นกลุ่ม ในกรณีที่ชิ้นส่วนนั้นเหมือนกัน เพื่อให้ง่ายต่อการกำหนดเอลิเมนต์

ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรม ซึ่งมี 3 ขั้นตอนดังนี้

- Preprocessing ถือว่าเป็นขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ เช่น การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) การกำหนดวัสดุ (Material Properties) แรงกระทำ (Load) เป็นต้น
- Solution การคำนวณหาผลเฉลย หรือหาคำตอบ
- Post Processing การแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงานหรือกราฟ

แผนภูมิการทำงานของระบบการออกแบบชิ้นงานและผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล



รูปที่ ข 1 แผนภูมิการทำงานของระบบการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล

ขั้นตอนการคำนวณผลจะแยกตามวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ได้ดังนี้

- Building the Mathematical Model (สร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์)
- Building the Computational Fluid Dynamics Model (สร้างรูปแบบชิ้นส่วนย่อย)
- Solving the Computational Fluid Dynamics Model (สร้างรูปแบบการแก้สมการ)
- Analysis the Results (การวิเคราะห์ผลเฉลย)

## 1.2 สร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์ผลด้วย CFdesign จะต้องทำการนำ Part ชิ้นงานที่ได้ทำการออกแบบของระบบปัญหาขอบเขตนั้นจากโปรแกรม Solid Work 2008 ทั้งชิ้นส่วน (Part) และ (Assembly) ชิ้นงานที่ต้องการทำการวิเคราะห์ผลจะถูกทำการแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ โดยมีจำนวนหลายๆ เอลิเมนต์ แต่มีจำนวนจำกัดที่สามารถนับได้ (Finite element mash) ขนาดของเอลิเมนต์จะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ หรือผู้วิจัยสามารถกำหนดเองก็ได้ ผู้วิจัยหรือผู้ออกแบบควรที่จะแน่ใจและมั่นใจในการสร้างชิ้นงานหรือขอบเขตของปัญหานั้นๆ เพราะอาจจะมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณ

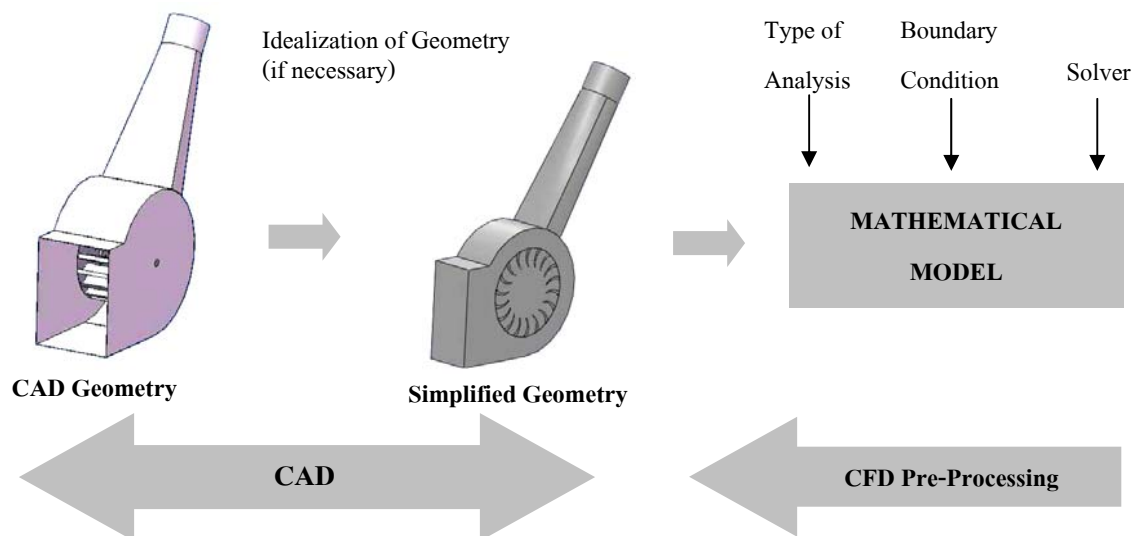
**Defeaturing** เป็นการพิจารณาขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วน โดยอาจจะต้องปรับรูปทรงของชิ้นงาน เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์และการประมาณผล

**Idealization** เป็นการพิจารณาขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วน โดยทำการประมาณผลเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบชิ้นส่วนจาก CAD ลง

**Clean up** เป็นการกำหนดบริเวณในการสร้างเอลิเมนต์ บริเวณที่ไม่มีผลกระทบจากการกระทบของแรงกระทำจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่ใหญ่ ส่วนที่มีผลกระทบของแรงบริเวณนี้จะมีความหนาแน่นของเอลิเมนต์มากกว่าบริเวณที่รับผลกระทบน้อย

การปรับปรุงชิ้นงานให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ผล ในเบื้องต้นอาจจะทำการปรับด้วย CAD ให้เป็นชิ้นงานที่เรียบง่ายเพื่อทำการปรับเปลี่ยนเอลิเมนต์ จะช่วยลดเวลาในการคำนวณ การกำหนดสร้างเอลิเมนต์ที่สมบูรณ์จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดรูปร่างเอลิเมนต์ และชนิดของเอลิเมนต์

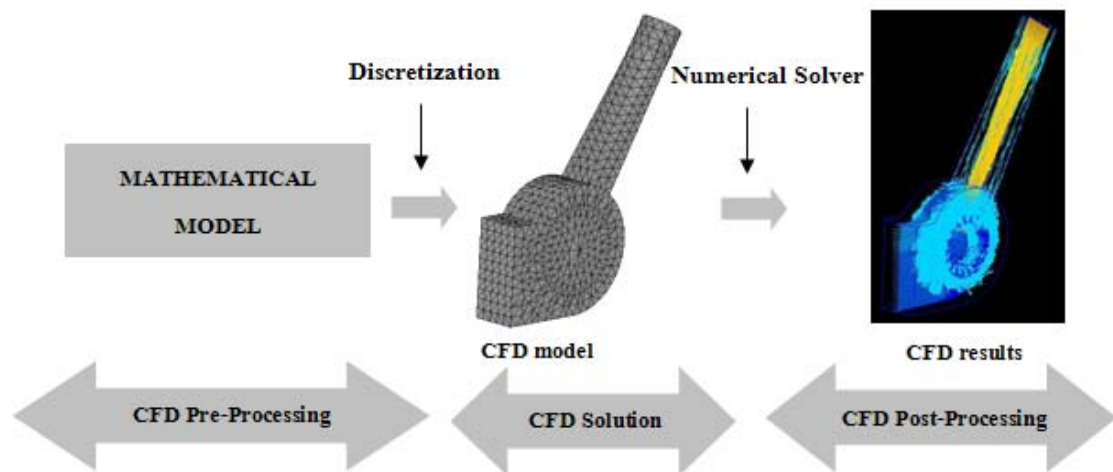
การเตรียมชิ้นงาน จะเริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างชิ้นส่วน การกำหนดความหนาแน่น ของเอลิเมนต์ ขนาดของเอลิเมนต์ และทิศทางของแรงกระทำ ตลอดจนเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา กระบวนการนี้จะสมบูรณ์ในขั้นตอนการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ซึ่งอธิบายได้ด้วยรูปที่ ข 2



รูปที่ ข 2 โมเดลเอลิเมนต์

### 1.3 โครงสร้างเอลิเมนต์และการคำนวณผล

การสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เป็นการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการแบ่งเอลิเมนต์ (Meshing) โดยเวกเตอร์ของแรงกระทำ และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่างๆของปัญหาที่กำหนดจะกระทำลงบนโหนด (Nodes) ของชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์ (Finite Element Mesh)



รูปที่ ข 3 โครงสร้างเอลิเมนต์และการคำนวณผล

#### 1.4 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล(CFD)

ผลลัพธ์ที่แสดงผลบนชิ้นส่วนหรือขอบเขตปัญหาต่างๆที่ได้ทำการวิเคราะห์และประมวลผล (CFD model) จะมีกระบวนการและวิธีการวิเคราะห์ผลที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์นั้นมีขีดความสามารถที่เพียงพอ จากนั้นโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์และประมวลผลในรูปแบบไฟล์ที่เราสามารถแก้ไขได้ (Interpretation) ซึ่งทำให้เราพิมพ์หรือกำหนดการทำงานของ การวิเคราะห์ผลได้

#### 1.5 ค่าความผิดพลาดจากการทำงาน

ในการสร้างโมเดลคณิตศาสตร์ จะเป็นช่วงต้นของความผิดพลาด ซึ่งโดยทั่วๆไปจะเรียกว่า Idealization Errors ซึ่งเป็นการลดความซับซ้อนของชิ้นส่วนเพื่อให้การคำนวณใช้เวลาในการคำนวณผลน้อยลง ชนิดของการผิดพลาดเราสามารถจำแนกออกได้ 3 ชนิด คือ

- ผิดพลาดจากการใช้งาน หรือเลือกวิธีการคำนวณผลที่ผิด
- ผิดพลาดจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้องในช่วงการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์
- ผิดพลาดในช่วงการหาค่าผลเฉลยของปัญหา (Solution Error) ซึ่งจะสามารถทำการแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นยากหรือง่ายนั้นเราสามารถทำการควบคุมได้

#### 1.6 เอลิเมนต์ (Element)

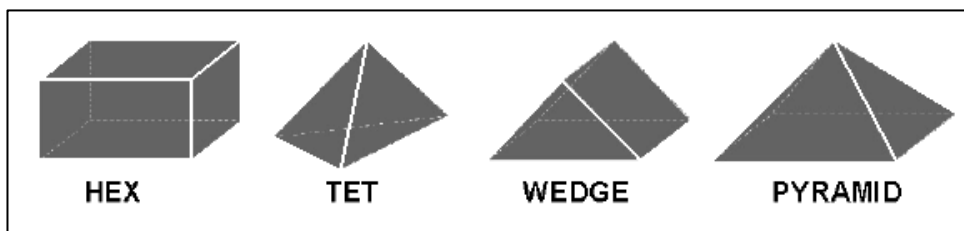
เมื่อนักวิจัยหรือผู้ออกแบบได้รู้และเข้าใจความหมายของการสร้างเอลิเมนต์เบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะต้องรู้ถึงวิธีการเลือกใช้เอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับปัญหาขอบเขตที่กำหนด เพราะชนิดของเอลิเมนต์ที่ทำการเลือกนั้น จะมีผลต่อความถูกต้องของคำตอบในการคำนวณ และส่งผลต่อความแม่นยำในการจำลองสนามการไหลในสภาวะการทำงานต่างๆ

CFdesign V9 จะทำการแบ่งเอลิเมนต์สำหรับเลือกใช้งานไว้หลายชนิด เพื่อให้ นักวิจัยและผู้ออกแบบสามารถเลือกมาใช้งานได้ง่ายและไม่เกิดความสับสน เพราะแต่ละเอลิเมนต์นั้นจะมีการปรับตั้งค่าแฟคเตอร์ความละเอียดที่แตกต่างกัน

ชนิดที่หนึ่ง เป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral Solid Element) การใช้งานจะใช้ในงานวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีรูปร่างตัน เช่นการวิเคราะห์ความร้อนของผนังที่มีอากาศไหลผ่าน

ชนิดที่สอง เป็นเอลิเมนต์พื้นผิวสามเหลี่ยม (Triangular shell) เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะของพื้นผิวงานที่เป็นแผ่นบาง โปรแกรมจะใช้เอลิเมนต์ทั้งสองชนิดนี้ในการสร้างชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์ โดยโปรแกรมจะทำการเลือกใช้องค์โดยอัตโนมัติ

ส่วนเอลิเมนต์แบบอื่นได้แก่ เอลิเมนต์ทรงหกหน้า (Hexahedral Element (Brick)) ในส่วนของเอลิเมนต์ทรงหกหน้านี้ ผู้ออกแบบหรือนักวิจัย จะไม่ทำการกำหนดค่าอัตโนมัติได้ นักวิจัยหรือผู้ออกแบบจำเป็นต้องทำการกำหนดเอง เอลิเมนต์ลักษณะนี้ จะใช้ได้เพียงบางขอบเขตของปัญหาเท่านั้น เลือกใช้ให้เหมาะกับงานวิจัย เพื่อให้คำตอบแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4 ลักษณะเอลิเมนต์ที่ใช้ในโปรแกรม CFdesign V9

## 1.7 แบบจำลองความปั่นป่วน

### 1.7.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$

ใช้กับการวิเคราะห์การไหลของของไหล แบบไหลวนอย่างอิสระ และไหลต่อเนื่องอิสระ  $k - \varepsilon$  Model เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วย Launder and Spalding เป็นแบบจำลองที่มีมานานและใช้กันอย่างแพร่หลาย

### 1.7.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$

ถูกพัฒนาขึ้นโดย D.C Wilcox ในปี ค.ศ. 1993 เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจาก  $k - \varepsilon$  โดยใช้สมมติฐานของ Boussinesq เพื่อหาค่า Reynolds Stress มีชื่อเรียกว่า Standard  $k - \omega$  เหมาะกับใช้วิเคราะห์คำนวณการไหลที่มีลักษณะหมุนวน

### 1.7.3 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ (Renormalization Group)

เหมาะกับการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วน ที่มีของไหลชนิดเดียว หรือของไหล 2 ชนิดที่แยกออกจากกัน เช่น น้ำและอากาศ



#### 1.7.4 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ (Shear-Stress Transport), SST

ได้พัฒนาโดย F.R. Menter ได้นำแบบจำลอง Standard  $k - \omega$  มาปรับปรุงพัฒนาในปี ค.ศ. 1994 แบบจำลองชนิดนี้เกิดจากการรวมเอาความถูกต้องและความแม่นยำของแบบจำลอง Standard  $k - \omega$  ที่บริเวณชั้นขีดผิวผนัง และการไหลวนของกระแสอิสระ  $k - \varepsilon$  ในสนามการไหลที่เกิดจากผนัง เกิดเป็นแบบจำลองนี้ขึ้นมา (SST)

#### 1.7.5 แบบจำลองความปั่นป่วน (Reynold Stress Model), RSM

จะใช้สมมติฐานของค่าความหนืดแบบปั่นป่วนเป็นแบบนอน-ไอโซทรอปิก

#### 1.7.6 แบบจำลองความปั่นป่วนของเรย์โนลด์ (Reynold-Averaged Navier-Stokes Turbulent Model), RANS

เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ประมาณค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์ จะใช้ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k - \varepsilon$  และ SST  $k - \omega$  แต่ไม่ค่อยนิยมใช้ในปัจจุบัน

#### 1.7.7 แบบจำลองความปั่นป่วนโดยวิธี Large Eddy Simulation (LES)

- LES จะใช้ร่วมกับ Eddy-Viscosity
- LES จะนำความสัมพันธ์ในการเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดหมุนวนของ Eddy-Viscosity มาช่วยในการคำนวณ
- LES จะใช้วิเคราะห์การปั่นป่วนของน้ำ เช่น รางเท ร่องน้ำ กระแสน้ำในมหาสมุทร และการไหลแบบชั้นบันได

#### 1.7.8 แบบจำลองความปั่นป่วน Low Re $k - \varepsilon$

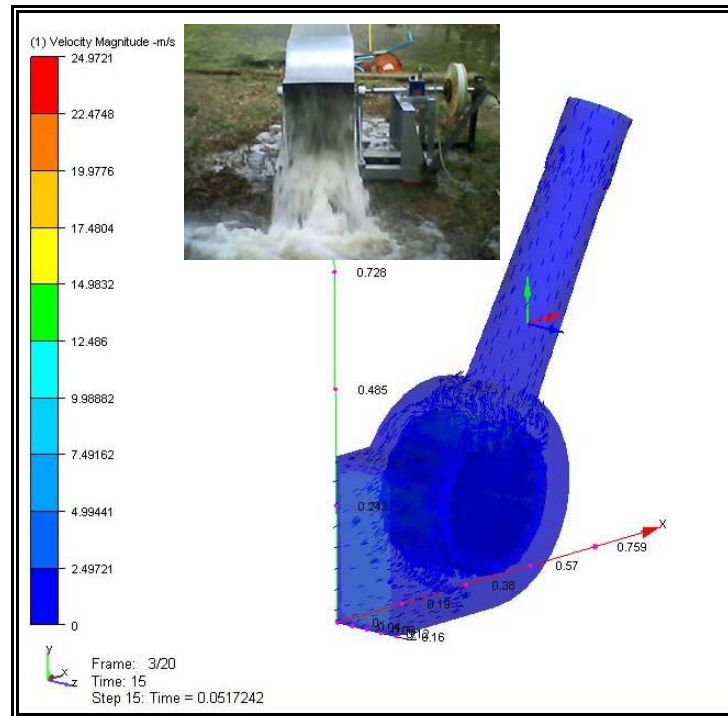
ใช้วิเคราะห์ความปั่นป่วนที่มีเลข Reynold ต่ำๆ อยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน

#### 1.7.9 แบบจำลองความปั่นป่วน Addy Viscosity Model

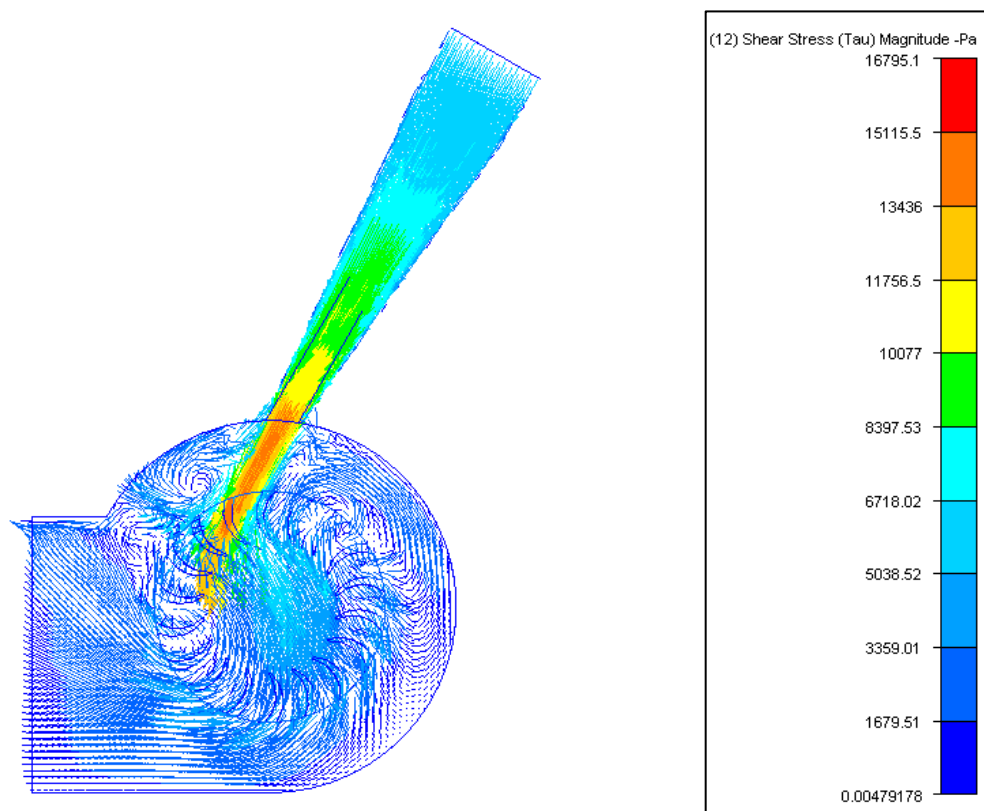
นิยมใช้วิเคราะห์ความหนืดของของไหลที่มีการหมุนวนเกิดขึ้น

#### 1.7.10 แบบจำลองความปั่นป่วน Mixing length

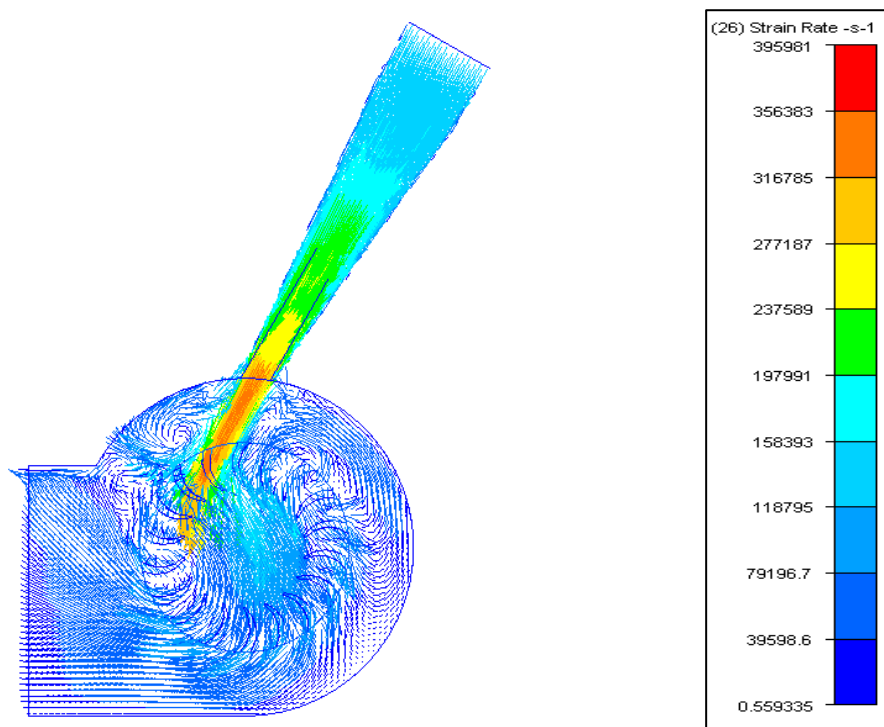
การวิเคราะห์ของไหลต่างๆ ที่มีอนุภาคเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบการวิเคราะห์



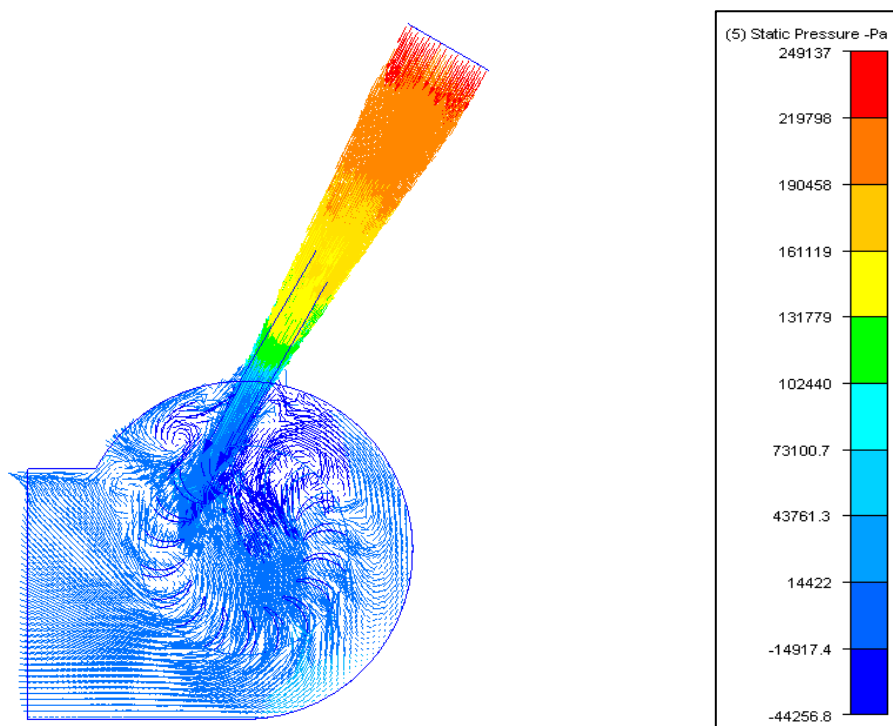
รูปที่ ข 5 การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล ที่คำนวณผลด้วยโปรแกรม CFdesign V9  
ในขณะที่ล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเริ่มทำการหมุน (มุม 60 องศา)



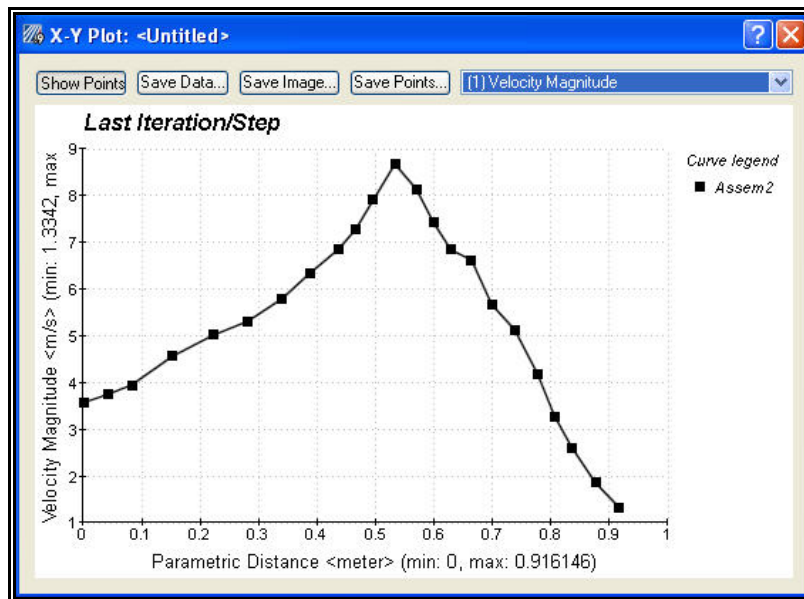
รูปที่ ข 6 การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลในส่วนของฟังก์ชั่น Shear Stress (มุม 60 องศา)



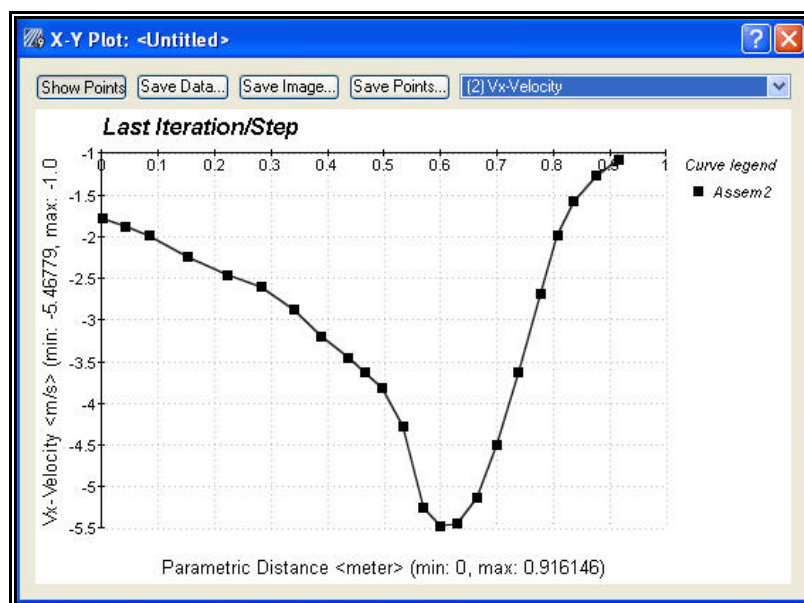
รูปที่ ข 7 การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลในส่วนของฟังก์ชั้น Strain Rate  
อัตราความเครียด (มุม 60 องศา)



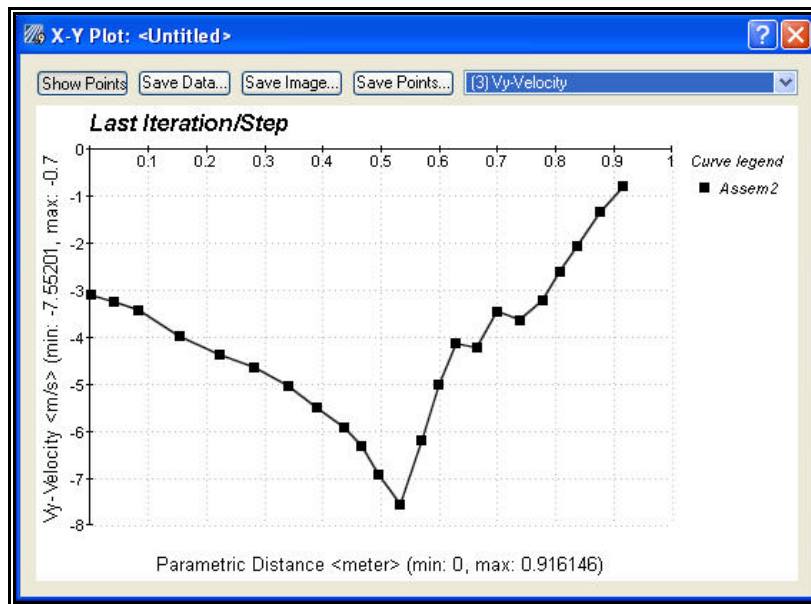
รูปที่ ข 8 การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลในส่วนของฟังก์ชั้น Static Pressure  
ค่าความดันสถิต (มุม 60 องศา)



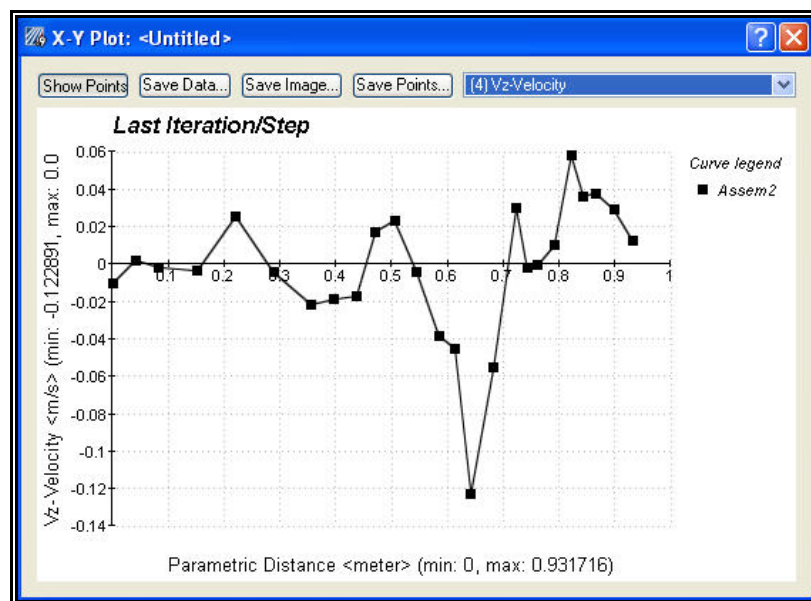
รูปที่ ข 9 ความเร็วที่จุดต่างๆ ภายในล้อยก้นน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ระนาบ X, Y (มุม 60 องศา)



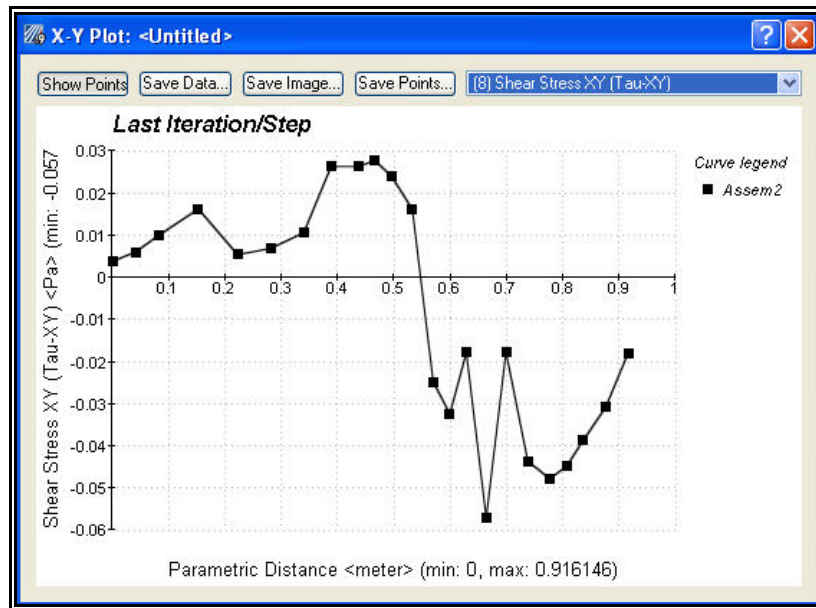
รูปที่ ข 10 ความเร็วในแนวแกน x (U-Velocity) มุม 60 องศา



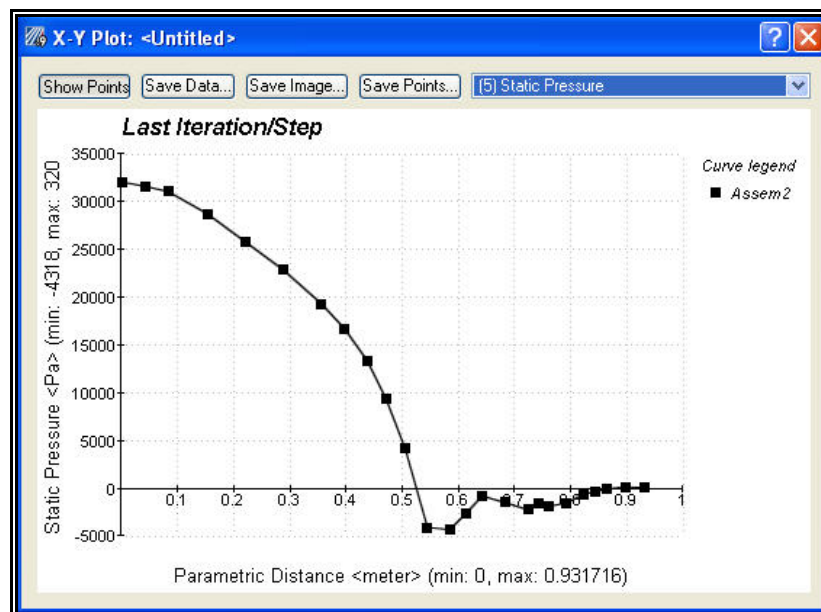
รูปที่ ข 11 ความเร็วในแนวแกน y (V-Velocity) มุม 60 องศา



รูปที่ ข 12 ความเร็วในแนวแกน z (W-Velocity) มุม 60 องศา



รูปที่ ข 13 ความเค้นเฉือนในระนาบ X, Y มุม 60 องศา



รูปที่ ข 14 ความดันสถิตในระนาบ X, Y มุม 60 องศา

ภาคผนวก ก  
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

# Proceedings

## The 1<sup>st</sup> Thailand Renewable Energy Community Configuration Conference (TREC)



School of Renewable Energy Technology, Naresuan University

1<sup>st</sup> TREC



23. การผลิตไฟฟ้า 100 กิโลวัตต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงร่วมไบโอดีเซล – แก๊สชีวมวล 185

ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

โดย ศุภวิทย์ ลวณะสกล

#### บทความสาขาลังงานทดแทนอื่นๆ

24. การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับกังหันลม 195

โดย ก่อเกียรติ อัดทรัพย์, ไพศาล บุญเจียม, บุญยัง ปลั่งกลาง และ อาทิตย์ โสตรโยม

25. การวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำขนาดเล็กโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 203

วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล

โดย วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล และ วิรัชย์ ไรยนรินทร์

26. กังหันน้ำขนาดเล็กแบบลูกตุ้มต่ำเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า 217

โดย อัครวิน ปศุศฤทธากร และ สัมพันธ์ ไชยเทพ

27. การสำรวจการใช้และการจัดหาแหล่งพลังงานในระดับหมู่บ้านหลังการ 227

เกิดอุทกภัยกรณีศึกษา: พื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์

โดย ดุษฎี คำบุญเรือง, ศิริรัช จินดารักษ์<sup>2</sup> และ สมชาย มณีวรรณ

28. การพัฒนาพลังงานเพื่อชุมชนชนบทอย่างยั่งยืน 235

โดย ธนิตน์ เรืองรุ่งชัยกุล และ สุทัศน์า กำเนิดทอง

#### บทความสาขาเศรษฐศาสตร์พลังงาน

29. กรณีศึกษาศักยภาพความเหมาะสมทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ 245

การใช้งานระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานกับความร้อนเหลือทิ้ง

ของโรงแรมอโมร่าท่าแพ

**การวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำขนาดเล็กโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล**  
**The Performance Analysis of The Micro Water Turbine Generator Using Computational Fluid**  
**Dynamics (CFD)**

**วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล<sup>1</sup>, วิรัชย์ โยชนรินทร์<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร 02-5493433 โทรสาร 02-5493432 E-Mail: [as\\_sutt@hotmail.com](mailto:as_sutt@hotmail.com),

**Werayoot Lahamonchaiyakul<sup>1</sup>, Wirachai Roynarin<sup>2</sup>, Ph.D.Machanical Eng.**

Department of Mechanical engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Pathumthani 12110 Thailand, Tel. 02-5493433 Fax. 02-5493432 E-Mail: [as\\_sutt@hotmail.com](mailto:as_sutt@hotmail.com)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล CFdesign V9 ซึ่งกังหันน้ำที่จำลองเป็นกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 310 มิลลิเมตร ซึ่งการจำลองเชิงตัวเลขนั้น กระทำโดยใช้กรรมวิธีการจำกัดปริมาตรในแนว 3 มิติ โดยสร้างปริมาตรควบคุม (Control Volume) ให้กับล้อกังหันน้ำเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณในการหาผลการทำงานโดยใช้สมการอนุรักษ์มวล และสมการโมเมนตัม ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี โดยค่าแรงบิดมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วสัมพัทธ์และมุมปะทะที่เข้าสู่หน้าตัดของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ผลเฉลยจากการคำนวณนี้สามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมมาออกแบบโวลูตและล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ให้มีประสิทธิภาพสูงได้

การศึกษาการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางด้านพลศาสตร์การไหลสรุปผลได้ว่ามุม 60 องศาจะได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดที่แรงบิด 39.56 N.m ที่ความเร็วรอบ 236 รอบ/นาที และพลังงานเกิดขึ้นได้ประมาณ 800 วัตต์ การวิเคราะห์การทำงานสามารถสรุปผลได้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างต้นแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งจะได้้นำผลการทดสอบต้นแบบมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทำงานจริงต่อไป

**Abstract**

The research presents the proposed results of analyzing the performance of micro water turbine, using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique from the commercial software called CFdesign V9. The modeling is 310 mm diameter using for the efficiency prediction in numerical method. The water turbine simulation producing the electricity is numerical modeled by varying flows through the turbine wheel. The duplication of the numerical is modeled by the control volume methodology. Additionally, it is easier for solving of the conservations equations using mass and momentum theory.

The prediction results are shown that the torque of turbine modeling are varied depending on the time domains and to be related to speed relation from the developed force. The duplication results show height efficiency at 60 degree angle of water attack to the turbine blade, producing of 39.56 Nm torque at 236 RPM which is 800 watts power output . The result of CFD prediction leads to make small prototyping and comparing the results of analytical and experimental model.

## 1. บทนำ

กังหันน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในน้ำให้เป็นพลังงานกลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของกังหันน้ำนั้นมีความยุ่งยากมากขึ้น เนื่องจากตัวแปรที่ไม่รู้ค่ามีมาก และยากสำหรับการคำนวณด้วยมือ และต้องใช้เวลามากในการคำนวณ เพื่อลดเวลาในการทำงานวิจัยลง จึงได้นำโปรแกรมคำนวณทางด้านพลศาสตร์ CFdesign V9 มาช่วยในการคำนวณหาค่าต่างๆที่เราต้องการ เพื่อให้สามารถออกแบบกังหันได้ถูกต้องต่อการใช้งานจริงมากที่สุด

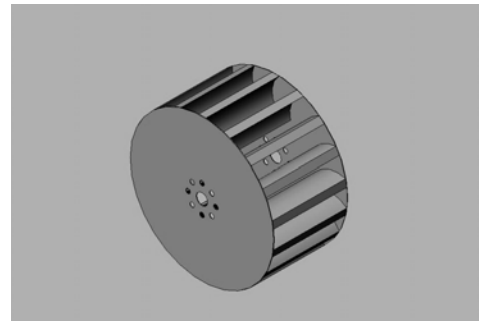
การคำนวณการไหลแบบพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamic: CFD) ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนามีความสามารถทำนายการไหลได้ถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ การใช้ CFD ทำนายพฤติกรรมของการไหลผ่านกังหันน้ำได้สำเร็จจะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการช่วยวิเคราะห์กังหันน้ำต่อไปได้ งานวิจัยนี้ประเมินศักยภาพของ CFD ในการศึกษาการไหลผ่านกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบ วิจัยและพัฒนากังหันน้ำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป

## 2. แบบจำลองกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

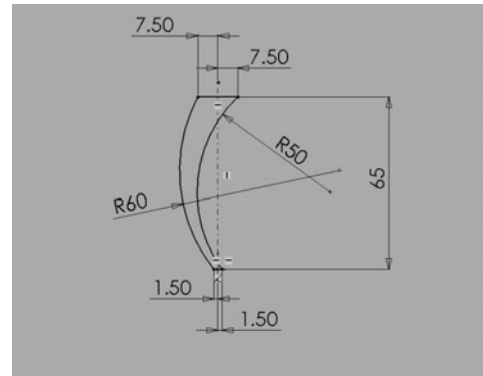
ลักษณะของกังหันน้ำที่ถูกจำลองเป็นกังหันน้ำขนาดเล็กที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า มีเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อกังหัน 310 มิลลิเมตร ความสูงใบกังหัน 65 มิลลิเมตร ความกว้างใบกังหัน 15 มิลลิเมตร ใบกังหันมีจำนวน 18 ใบ ลักษณะของล้อกังหันน้ำที่จำลองเป็นดังรูปที่ 2 และ 3 ส่วนรูปที่ 1 นั้นแสดงถึงองค์ประกอบจริงของล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล



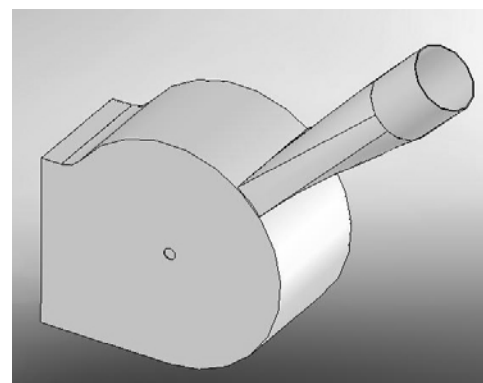
รูปที่1 ลักษณะของกังหันน้ำ



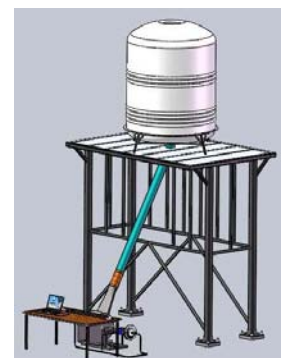
รูปที่2 แสดงลักษณะล้อกังหันน้ำจำลอง



รูปที่3 ขนาดหน้าตัดของใบกังหันน้ำจำลอง



รูปที่4 แสดงลักษณะโวลูตกังหันน้ำจำลอง



รูปที่5 แสดงองค์ประกอบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจำลอง

### 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 สมการพื้นฐานของการไหล

ในบทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวไม่ได้ เป็น การไหลแบบมีความหนืด สมการที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ สมการความ ต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน โดยสามารถเขียนสมการ ดังกล่าวให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้ คือ

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial y_i} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน x

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho u_i v_j)}{\partial y_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_j} \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial y_j} \right] \right] \quad (2)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน y

$$\frac{\partial(\rho u_i v_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial y_j} = -\frac{\partial p}{\partial y_i} + \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left[ \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_j} \mu \left[ \frac{\partial v_i}{\partial y_j} \right] \right] + (\rho - \rho_0)g \quad (3)$$

สมการพลังงาน

$$\rho c_p \left[ \frac{\partial(u T_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial(v T_j)}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k \frac{\partial T_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_i} \left[ k \frac{\partial T_j}{\partial y_i} \right] \quad (4)$$

ค่าความเค้นเฉื่อยเนื่องจากความหนืด,  $\bar{t}_{ij}$  จะประมาณเป็น

$$\bar{t}_{ij} \cong \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

โดย  $\mu$  คือ Laminar viscosity ส่วนค่าความเค้นเฉื่อยของ Reynolds.

Stress,  $\bar{t}_{ij}$  จะเขียนอยู่ในรูป

$$\bar{t}_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (6)$$

ค่า  $\bar{t}_{ij}$  ซึ่งยังไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องอาศัยแบบจำลอง  $k - \varepsilon$  Model ในการหาค่า  $\bar{t}_{ij}$

ใน  $k - \varepsilon$  Model เทอมของ Reynolds Stress, จะถูกสร้างเป็น ความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ Mean Stress Rate โดย Eddy Viscosity จะ กำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ Turbulent Kinetic Energy, (K) และ Dissipation Rate ( $\varepsilon$ ) โดยใช้ Bossiness's approximation [2,3] คือ

$$t_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k) + u_i \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

โดยที่  $u_t = \rho c_u k^2 / \varepsilon$  คือ Turbulent Eddy Viscosity

สมการของ Turbulent Kinetic Energy (TKE) (k) จะอยู่ในรูป [2, 3]

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{u_e}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (8)$$

สมการของ Dissipation Rate ของ Turbulent Kinetic Energy [2,3] จะ ได้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{u_e}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (9)$$

ซึ่ง G แทน Generation Rate of Turbulent Kinetic Energy ขณะที่  $\rho \varepsilon$  เป็น Dissipation Rate โดย G จะเป็น

$$G = u_e \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

ค่าขอบเขตสำหรับค่าต่างๆของ Turbulent ที่ใกล้เคียงสามารถหาค่าได้ จาก Wall Function โดยมีค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับค่าสมการต่างๆที่ผ่านมามีดังนี้คือ

$\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ , และ  $C_u = 0.09$  เป็น

ค่าคงที่ [4] โดยที่  $u_e = u_t + u$

#### 3.2 Reynolds Stress Model (RSM)

Reynolds-Averaged Transport Equation สำหรับการแก้ปัญหา

$\bar{t}_{ij}$ , [2, 3] แล้วสามารถจัดรูปสมการต่างๆได้ใหม่เป็น

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \tau_{ij})}{\partial x_k} = -G_{ij} - \phi_{ij} + D_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (11)$$

$$G_{ij} = \rho P_{ij} = - \left[ \overline{\rho u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \rho u'_j u'_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right]$$

$$\phi_{ij} = \rho P_{ij} = -c_1 \frac{\rho \varepsilon}{k} \left[ u'_i u'_j - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] - c_2 \left[ G_{ij} - \frac{2}{3} G \delta_{ij} \right]$$

$$D_{ij} = - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \frac{u_e}{\sigma'} \right) \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_k} \right]$$

$$\varepsilon_{ij} = - \left[ \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \right]$$

โดยที่  $G_{ij}$  = Local production  $\phi_{ij}$  = Local pressure strain,

$D_{ij}$  = Net diffusive transport  $\mathcal{E}_{ij}$  = Local dissipation tensor

โดยที่  $C_1=2.5$  และ  $C_2=0.55$  เป็นค่าคงที่ [2]

การคำนวณหาความเร็วของน้ำ พิจารณาจากกฎทรงพลังงาน (Energy conservation) จะได้ว่าน้ำเมื่อตกลงมาพลังงานศักย์ของน้ำจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้ [7]

$$E_p = E_k$$

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v^2 = 2gH$$

ความเร็วของน้ำหาได้จาก  $v = \sqrt{2gH}$  (12)

โดยที่  $v$  คือความเร็ว (m/s)  $g$  ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (มีค่าคงที่  $9.8 \text{ m/s}^2$  หรืออาจใช้ค่าประมาณ  $10 \text{ m/s}^2$  เพื่อสะดวกต่อการคำนวณ)  $H$  คือความสูง (m)

พิจารณาการไหลของลำน้ำที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัด  $A$  ด้วยความเร็ว  $v$  จะได้ปริมาตรของการไหลของน้ำ [7]

$$Q = AV \quad (13)$$

สามารถหาโมเมนต์ที่ข้อบล็อได้ดังนี้ [8]

$$M_t = F \times \frac{D}{2} \quad (14)$$

สามารถหาแรงขับที่ข้อบล็อได้ดังนี้ [8]

$$F' = 2m_s(c_1 - u') \quad (15)$$

จากสมการที่ (15) เราสามารถหาความเร็วข้อบล็อ  $u'$  ได้

$$u' = c_1 - \frac{F'}{2m_s} \quad (16)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นเราสามารถหาความเร็วรอบของล้อกังหันน้ำได้ดังนี้ [8]

$$n' = \frac{60 \times u'}{\pi \times M_t} \quad (17)$$

เราสามารถหาประสิทธิภาพของกังหันน้ำได้จากสมการ [9]

$$\eta_{total} = \frac{P_e}{P_i} \quad (18)$$

เมื่อ  $P_e$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันน้ำ

$P_i$  คือ กำลังของน้ำที่ให้แก่กังหันน้ำ

$$P_i = gQh_w \quad (19)$$

เมื่อ  $Q = AV$

#### 4. การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณในโปรแกรม

##### CFdesign V9

##### 4.1 การคำนวณหาความเร็วน้ำ

จากสมการที่ (10) จะได้

$$v = \sqrt{2 \times 9.81 \times (2)} = 6.324 \text{ m/s}$$

##### 4.2. การคำนวณหาความเร็วรอบของล้อกังหัน

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ ล้อกังหันน้ำ  $D = 310 \text{ mm}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเจตน้ำ  $d = 90 \text{ mm}$   $D = 140 \text{ mm}$  ความเร็วพุ่งของเจตน้ำที่คำนวณได้  $v = 10 \text{ m/s}$

อัตราการไหลของเจตน้ำ  $v_s = \frac{\pi d^2}{4} \times c_1$

$$= \frac{3.14}{4} \times (14 \text{ cm})^2 \times 1000 \text{ cm/s} = 153860 \text{ cm}^3/\text{s}$$

มวลน้ำ

$$M_s = 153860 \text{ cm}^3/\text{s} \times 0.001 \text{ kg/cm}^3 \\ = 153.86 \text{ kg/s}$$

หาโมเมนต์ที่ข้อบล็อ  $M_t = F \times \frac{D}{2}$

$$\frac{D}{2} = \frac{0.31 \text{ m}}{2} = 0.155 \text{ m}$$

$$F' = \frac{0.31 \text{ kNm}}{0.155 \text{ m}} = 2 \text{ kN}$$

$$M_t = 2 \text{ kNm} \times \frac{0.31 \text{ m}}{2} = 0.31 \text{ kNm}$$

$$\text{แต่ } F' = 2m_s \times (c_1 - u')$$

$$\text{หรือ } u' = c_1 - \frac{F'}{2m_s}$$

$$u' = 10 \text{ m/s} - \frac{2000 \text{ N}}{2 \times 153.86} \text{ kg/s} = 3.50 \text{ m/s}$$

$$\text{ดังนั้นความเร็วรอบ } n' = \frac{60 \times 3.50}{\pi \times 0.31} = 215.82 \text{ rpm}$$

เลือกใช้ค่า = 216 ใช้ในการคำนวณ

##### 4.3 ค่าคงที่ต่าง ๆที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์

น้ำ = มีค่าความหนาแน่น (Density)  $998.2 \text{ kg/m}^3$

= มีค่าความหนืด (Viscosity)  $0.001003 \text{ Pa-s}$

= มีค่าการนำความร้อน (Conductivity)  $0.6 \text{ W/m-k}$

= มีค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)  $4182 \text{ J/kg-k}$

= มีค่าความดัน (Pressure)  $101325 \text{ Pa}$

= มีค่าอุณหภูมิ (Temperature)  $19.85 \text{ Celsius}$

= มีค่า Compressibility  $2.18565 \times 10^{-9} \text{ Pa}$

กำหนดให้ ความดันทางออกมีค่าเท่ากับ 0

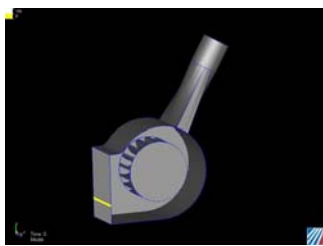
กำหนดให้การหมุนของล้อยก้านหน้าผลิตไฟฟ้า เป็นการหมุนแบบ Rotating Region ที่มีความเร็วในการหมุน Rotational Speed = 236 RPM จากการคำนวณในหัวข้อ (4.2)

กำหนด Element size ให้กับล้อยก้านหน้า = 0.02m ให้กับโวลูต กังหันน้ำ = 0.03m

## 6. ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม

จากการศึกษาในครั้งนี้ โดยโปรแกรมสำเร็จรูป CFdesign V9 ช่วยในการจำลองหาตำแหน่งองค์ที่เหมาะสมต่ออัตราการไหลและช่วยในการออกแบบโวลูตล้อยก้านหน้า เพื่อให้โวลูตล้อยก้านหน้านั้นมีรูปทรงที่เหมาะสมกับการไหลเพื่อไม่ให้เกิดการกระจายความดันสะสมในระบบ และให้ได้ทอร์คมากที่สุด เพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้า

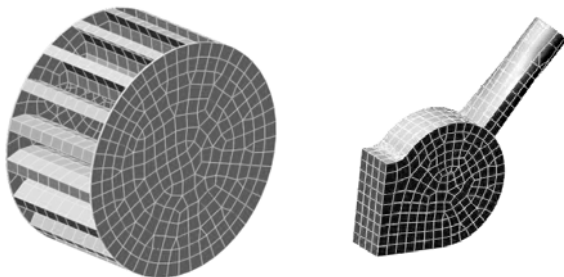
จากการศึกษานั้นจะเห็นว่าชิ้นส่วนองค์ประกอบของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้านั้นมีชิ้นส่วนมากมายหลายชิ้น โปรแกรมจะใช้เวลามากในการสร้าง Mesh และการคำนวณ เพื่อลดเวลาในการคำนวณลง เราจึงเลือกใช้วิธีการกำหนดโดเมนเพียงส่วนหนึ่งของโดเมนทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วน 2 ส่วนคือ โวลูตล้อยก้านหน้า และล้อยก้านหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงองค์ประกอบในการคำนวณ

เงื่อนไขในการคำนวณ คือ ความสูงของหัวน้ำเฉลี่ย 2 เมตร น้ำ ความเร็วน้ำที่ไหลประทะหน้าดัดล้อยก้านหน้า  $v = 6.324 \text{ m/s}$  ล้อยก้านน้ำหมุนด้วยความเร็วรอบ 236 rpm เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน จึงใช้แบบจำลอง  $k - \epsilon$  Turbulence Model

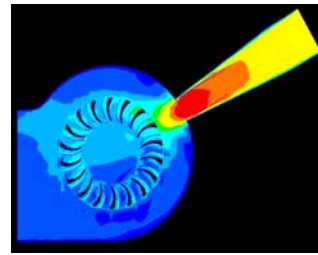
ขั้นตอนเตรียมการวิเคราะห์ ทำการสร้าง Mesh ให้กับโวลูตและล้อยก้านน้ำดังรูปที่ 5



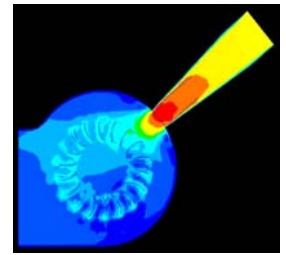
รูปที่ 5 แสดงการสร้าง mesh

จากการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม CFdesign V9 เพื่อหามุมประทะที่เหมาะสมของการไหลของน้ำ เพื่อให้ล้อยก้านหน้าผลิตไฟฟ้านั้นได้ทอร์ค

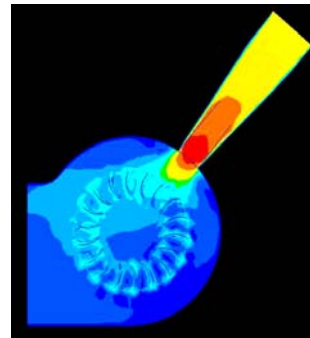
มากที่สุด ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถมองเห็นลักษณะการไหลของน้ำ และการกระจายความดันในมุมต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 6



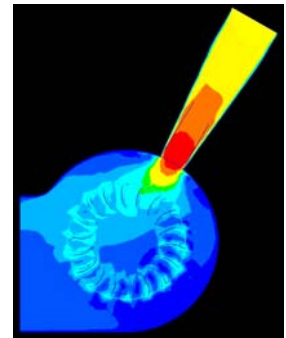
30 องศา



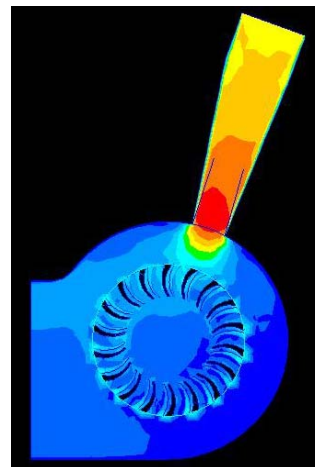
40 องศา



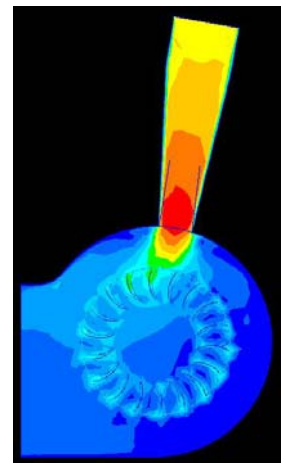
50 องศา



60 องศา



70 องศา



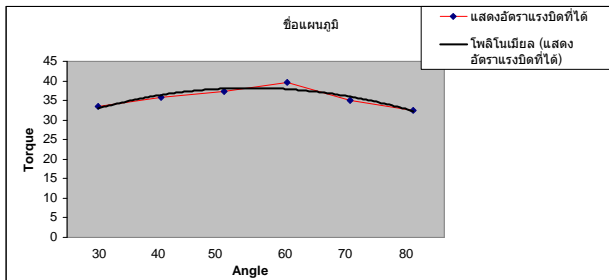
80 องศา

รูปที่ 6 แสดงการไหลและการกระจายความดันที่มุมต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม CFdesign v9

จากลักษณะการไหลและการกระจายความดันของน้ำภายในของล้อยก้านน้ำที่มุมต่างๆ ที่เปรียบเทียบกับกัน ก็จะแสดงให้เห็นค่าแรงบิดที่ได้ต่างกันไปตามมุมทอเจตน้ำดังรูปที่ 7

มุมท่อน้ำ (องศา)	แรงบิดที่ได้ (Torque) N-m
30	34.60
40	35.75
50	36.38
60	39.56
70	35.15
80	31.42

รูปที่ 7 แสดงตารางแรงบิดที่มุมต่างๆ (CFD)



รูปที่ 8 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงบิดที่มุมต่างๆจากผลของ (CFD)

จากรูปที่ 7 แสดงตารางค่า Torque เทียบกับมุมต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิด (Torque) มีการเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากัน ที่มุม 60 องศาเราจะได้ (Torque) มากที่สุดเนื่องจากเกิดแรงประทะได้ดีที่สุด สามารถเปรียบเทียบได้จากกราฟรูปที่ 8 จะเห็นเส้นกราฟที่ขึ้นไปสูงสุดที่มุม 60 องศาแล้วจึงลง เราสามารถหาค่าพลังงานได้จากสมการ  $T = P\omega$  เมื่อ T คือแรงบิด (N-m) และ  $\omega$  คือความเร็วเชิงมุม

$$T = P\omega$$

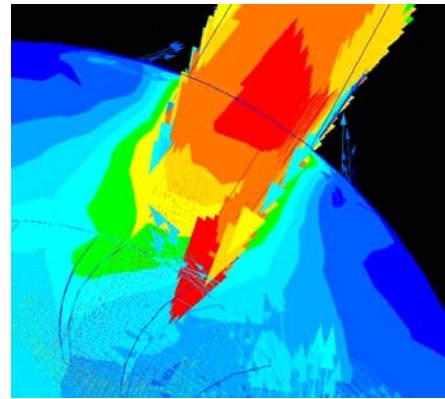
$$P_e = T\omega \text{ เมื่อ } \omega \text{ คือ } \frac{2\pi N}{60}$$

$$P_e = 39.56 Nm \times \frac{2 \times \pi \times 236 rpm}{60}$$

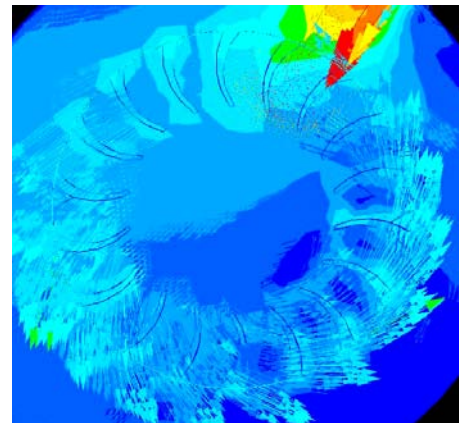
$$P_e = 39.56 \times 24.70 = 879.36 watt$$

$$= 0.879 kw$$

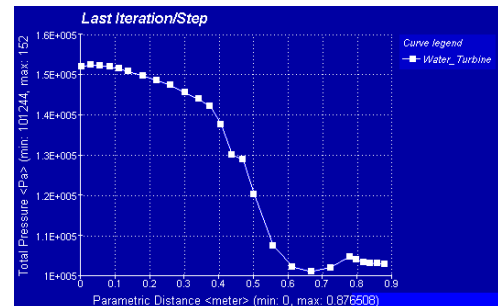
มุมของท่อน้ำ (ท่อน้ำ) ที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้แรงบิด(Torque) มากที่สุดคือ 60 องศา ซึ่งมุม 60 องศาจะเป็นมุมที่น้ำประทะกับหน้าตัดกังหันน้ำได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับมุมอื่นดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงมุมประทะที่ดีที่สุด ที่มุม 60 องศา



รูปที่ 9 แสดง Vector การไหลหลังที่น้ำประทะลัดกังหันพอดีที่มุม 60 องศาที่ได้จากการวิเคราะห์



รูปที่ 8 แสดงผลรวมความดันที่จุดต่างๆในล้อยก้านน้ำที่มุม 60 องศา บริเวณทางเข้าจนถึงจากออกของน้ำที่ได้จาก CFD

นอกจากการคำนวณเรายังสามารถหาประสิทธิภาพของกังหันน้ำได้จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นได้ดังนี้

$$\eta_{total} = \frac{P_e}{P_i}$$

จากสมการที่ 17 จะได้

$$P_i = 9.81 m/s^2 \times 0.0973 m^3/s \times 2m = 1.9 kw$$

จะได้

$$\eta_{total} = \frac{0.879kw}{1.9kw} = 0.46 \times 100$$

$$= 46 \%$$

## 7. สรุปและวิเคราะห์

การจำลองการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยโปรแกรม CFDesign V9 ถือว่าประสบผลสำเร็จในขั้นต้น โดยสามารถหาผลเฉลยในรูปของ ความเร็วและ ความดัน และ ทอร์ค ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์การออกแบบและพัฒนากังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้าต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Blazek, J., 2001. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier, Netherlands.
- [2] Wilcox C.D., "Turbulent Modeling for CFD", DCW Industries, Inc., (1993), California.
- [3] Gatski T.B., "Turbulent Flows : Model Equations And Solution Methodology", in Handbook Of Computational Fluid Mechanics, Edited By Roger Peyret, Academic Press Ltd, (1986), London.
- [4] Versteeg H.K. and Malalasekera W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited, (1995), England
- [5] Ponta, F.L. and Jacovkis, P.M.2000. A vortex model for Darrieus turbine using finite element techniques. Renewable Energy 24-1-8
- [6] Strickland, J.H.1975. The Darrieus turbine: performance prediction model using multiple streamtubes. SAND 75-0431, Sandia lab., Albuquerque, New Mexico
- [7] กชกร ธานีวัฒน์. (2547, เมษายน). "จับตาพลังงานหมุนเวียนปี 47 ไทยขึ้นแท่นผู้นำอาเซียน," รักษ์พลังงาน. 2(6) : 7-8.
- [8] Robert Peele, Mining Engineers' Handbook, vol.II, John Wiley & Sons, New York, 1966.
- [9] A.T. 1992. Hydraulic Compressible Flow Turbo machines, McGraw-Hill (UK)



## การใช้ CFD ในการคำนวณหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของกังหันลมแกนตั้ง

# The Optimum Rotation Calculation of Vertical Wind Turbine Using Computational Fluid Dynamics (CFD)

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล<sup>1</sup> และวิรัช โยรินรินทร์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 0-2549-3571

Werayoot Lah-amornchaiyakul<sup>1</sup> and Wirachai Roynarin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineer, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

Thanyaburi 39 Muh1, Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong Hok, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand

Tel : 02-5493497 E-mail : werayoot\_mechanical@hotmail.com, wirachairoynarin@yahoo.com

### บทคัดย่อ

กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในลม ให้เป็นพลังงานกล เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามทิศทางของแกนกังหันได้เป็นกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอน กังหันลมแกนตั้งนั้นมีข้อดีที่เด่นชัดเหนือกังหันลมแกนนอน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดเฟืองทดสามารถติดตั้งที่ด้านล่างใกล้กับพื้นดินได้ ไม่มีความจำเป็นต้องหันหาทิศทางลม ส่วนข้อเสียคือแรงบิดที่ได้มีค่าไม่คงที่ในการหมุนรอบแกนหนึ่งรอบการหมุน และไม่สามารถเริ่มต้นการหมุนด้วยตัวเองได้เหมือนกังหันลมแกนนอน การหาค่าประสิทธิภาพ และความเร็วรอบการหมุนที่ความเร็วลมต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมต่อการออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และชุดเฟืองทดต่างๆ ของกังหันลมแกนตั้งนั้น มีความยุ่งยากมาก และต้องใช้เงินทุนสำหรับงานวิจัยสูง เพราะต้องทำการสร้างต้นแบบและอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบ

งานวิจัยนี้ เพื่อลดต้นทุนและเวลาในการวิจัย จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อนำแบบจำลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล Computational Fluid Dynamic (CFD) เพื่อทำการหาผลเฉลยของผลลัพธ์ ให้ครอบคลุมทุกเงื่อนไขการทำงานของกังหันลมและการหาประสิทธิภาพต่างๆของกังหันลมแกนตั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการออกแบบเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้า (Generator) และระบบเฟืองทดให้เหมาะสมกับกังหันลมแกนตั้งทุกๆระดับความเร็วลมที่ใช้งาน

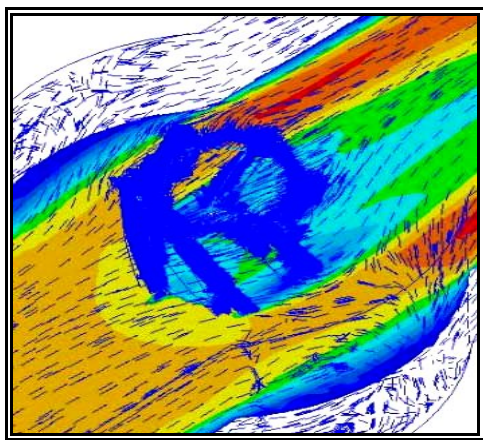
**คำสำคัญ:** ชุดกำเนิดไฟฟ้า, วิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล, อัตราส่วนความเร็วปลายปีก

### 1. บทนำ

ในการวิจัยและการพัฒนากังหันลมชนิดต่างๆใช้เองภายในประเทศเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก เพราะจะทำให้ประเทศนั้น มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้นและจะได้นำเทคโนโลยีที่ได้มาพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์แก่ชุมชนและประเทศชาติมากที่สุด แต่ปัญหาในการวิจัยและพัฒนากังหันลมแต่ละชนิดนั้นย่อมเป็นเรื่องที่ยากเนื่องจากความซับซ้อนของอากาศที่มีค่อนข้างสูง การที่จะสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำการอธิบายปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับกังหันลมขณะที่ทำการหมุนเพื่อให้ผลการวิจัยแม่นยำ ย่อมเป็นเรื่องที่ยากแก่นักวิจัยหลากหลายสาขาในปัจจุบัน ด้วยเหตุผลนี้ การที่จะสร้างหรือออกแบบระบบการทำงานต่างๆของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เช่น ชุดกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ชุดเฟืองทดและระบบต่างๆทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นต้น ย่อมเกิดปัญหาและต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการสร้างต้นแบบเพื่อทำการทดสอบ

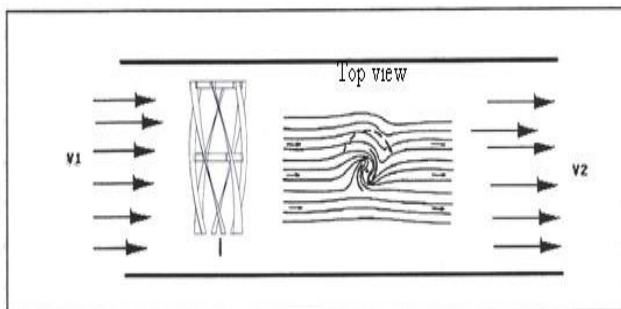
การคำนวณผลทางด้านพลศาสตร์ของไหล Computational Fluid Dynamic (CFD) ก็เป็นอีกเครื่องมือ

หนึ่งสำหรับนักวิจัยในปัจจุบัน เนื่องด้วยความสามารถทางด้านคอมพิวเตอร์และโปรแกรม โปรแกรม CFdesign V8 จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ใช้คำนวณ และจำลองสนามการไหลของอากาศ ในการหาผลเฉลยของผลลัพธ์ในปัญหาต่างๆได้แม่นยำในระดับหนึ่ง ทำให้ลดช่วง เวลาในการคำนวณ การทดสอบ และค่าใช้จ่ายในการวิจัย ในการหาผลเฉลยด้วยการทดลองจริงได้มาก สำหรับการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมแกนตั้ง (Vertical Wind Turbine) เมื่อกังหันลมแกนตั้งเริ่มทำการหมุน อาจสมมุติพฤติกรรมกังหันลมเป็นแบบทรงกระบอกที่กำลังหมุนภายในอุโมงค์ลมที่สภาวะการทำงานจริงที่ได้จากการจำลอง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1

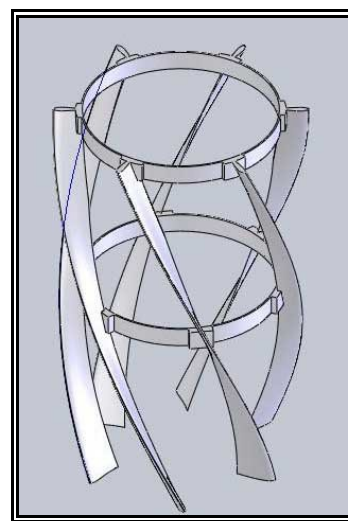
โปรไฟล์การไหลของอากาศขณะที่เคลื่อนที่ ที่อยู่ในรูปเวกเตอร์ความเร็วจะมีลักษณะการไหลวนเป็นแบบวงกลม ดังแสดงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2

## 2. การจำลองผลเชิงตัวเลข

ลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ถูกจำลองขึ้น ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นกังหันลมแกนตั้ง (Vertical Wind Turbine) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. หรือ 0.5 เมตร ความยาวใบกังหัน 1 เมตร ใบกังหันมีจำนวน 6 ใบ ในการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหลนี้ให้ใช้ระดับความเร็วต้นทั้ง 5 ระดับ คือ 2, 4, 6, 8, 10 เมตรต่อวินาที เพื่อเปรียบเทียบดูการเปลี่ยนแปลงการไหลที่เกิดขึ้น และความเร็วรอบการหมุนของใบกังหัน จะถูกแปรค่าเพื่อหาสัมประสิทธิ์กำลังเป็นฟังก์ชันความเร็วปลายปีกลักษณะของกังหันลมแกนตั้งจำลองจะเป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ใบกังหันลมจำลอง

การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFdesign V8 ซึ่งเป็นโปรแกรมการคำนวณผลเชิงพาณิชย์ที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบัน โดยใช้วิธีการปรับค่าเอลิเมนต์ให้กับแบบจำลองเพื่อความละเอียดของผลลัพธ์ ในการหาผลเฉลยของสมการอนุกรมและโมเมนต์ รูปแบบและพฤติกรรมของการไหลของของไหลมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก และเสียเวลาในการคำนวณผลมาก จึงนำ CFdesign V8 มาทำการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น การคำนวณผลถูกทำการแบ่งออกเป็นสองส่วนที่สำคัญคือ โดเมนส่วนที่มีการหยุดอยู่กับที่ และส่วนของโดเมนที่มีการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากการหมุนไปพร้อมกับแกนอ้างอิง รูปแบบของความเร็วและความสัมพันธ์ของความเร็วสัมพัทธ์และ

ความเร็วสมบูรณ์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการได้เป็น

$$\vec{v}_r = \vec{v} - (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad (1)$$

เมื่อ  $\vec{v}_r$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์  $\vec{v}$  คือ ความเร็วสมบูรณ์  $\vec{\Omega}$  คือความเร็วเชิงมุมของการหมุนของกังหันลมแกนตั้ง  $\vec{r}$  คือ รัศมีของกังหันลมแกนตั้ง และการหมุนของโดเมนดังกล่าว ทำให้เกิดแรงเกิดขึ้นสองพจน์ ในระบบที่อยู่ในรูปของสมการโรเมนตัม [1] ซึ่งสามารถเขียนรูปแบบสมการให้อยู่ในลักษณะของความเร็วสัมพัทธ์ได้ดังนี้

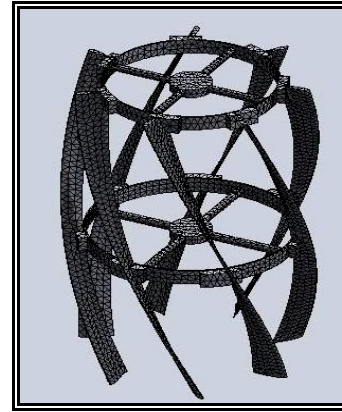
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}_r) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}_r) + \rho(2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r + \vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}) \\ = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \end{aligned} \quad (2)$$

พจน์ของ  $\rho(2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r)$  คือแรง Coriolis. และ  $\rho(\vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r})$  คือแรงหนีศูนย์กลาง โดยที่  $p$  คือความดันสถิตย  $\vec{\tau}$  คือ เทนเซอร์ของความเค้น  $\rho \vec{g}$  คือแรงโน้มถ่วงของโลก ในที่นี้เทนเซอร์ของความเค้นหาได้จากกฎแรงเฉือนของนิวตันผนวกกับทฤษฎีของ Stokes' hypothesis ดังนี้

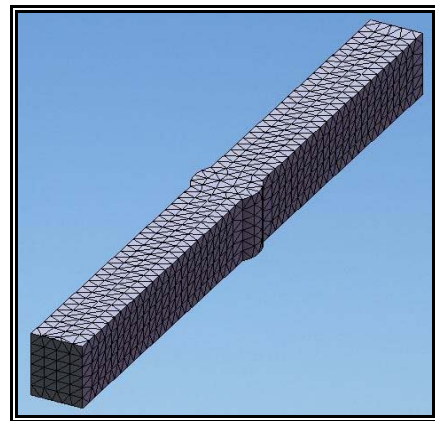
$$\vec{\tau} = \mu \left[ (\vec{\nabla} \vec{v} + \vec{\nabla} \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

โดยที่  $\mu$  คือความหนืดของของไหล และ  $I$  คือ ยูนิทเทนเซอร์ ในการคำนวณเอลิเมนต์โดยการปรับค่าความละเอียดให้ขึ้นส่วนในการคำนวณผลหรือโดเมนที่กำหนดในเวลาที่โดเมนนั้นเกิดการหมุน โปรแกรมก็จะทำการคำนวณความละเอียดตามค่าตัวแปรที่กำหนด โดยวิธีการหาค่าความต่างของผลเฉลยของเอลิเมนต์ ที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดต่อความสัมพันธ์ของโดเมนที่ใช้งาน ซึ่งเอลิเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นเอลิเมนต์แบบ Tetrahedron ที่ใบกังหันลมจะประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ขนาด 3 mm ทั้งหมด 115,750 เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3 (ก) และที่อุโมงค์ลมจำลองจะประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ขนาด 5 mm ทั้งหมด 97,500 เอลิเมนต์ จะ

เห็นได้ว่าที่บริเวณใบกังหันลมจะมีเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กกว่าและมีจำนวนเอลิเมนต์มากกว่าที่อุโมงค์ลมจำลองเพราะตามหลักวิชาไฟไนต์เอลิเมนต์ส่วนที่ต้องการรู้ผลมากที่สุดส่วนนั้นควรที่จะมีจำนวนเอลิเมนต์ละเอียดที่สุด ดังนั้นผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 3 (ข)

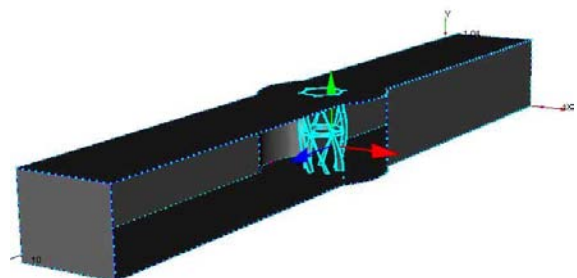


(ก)



(ข)

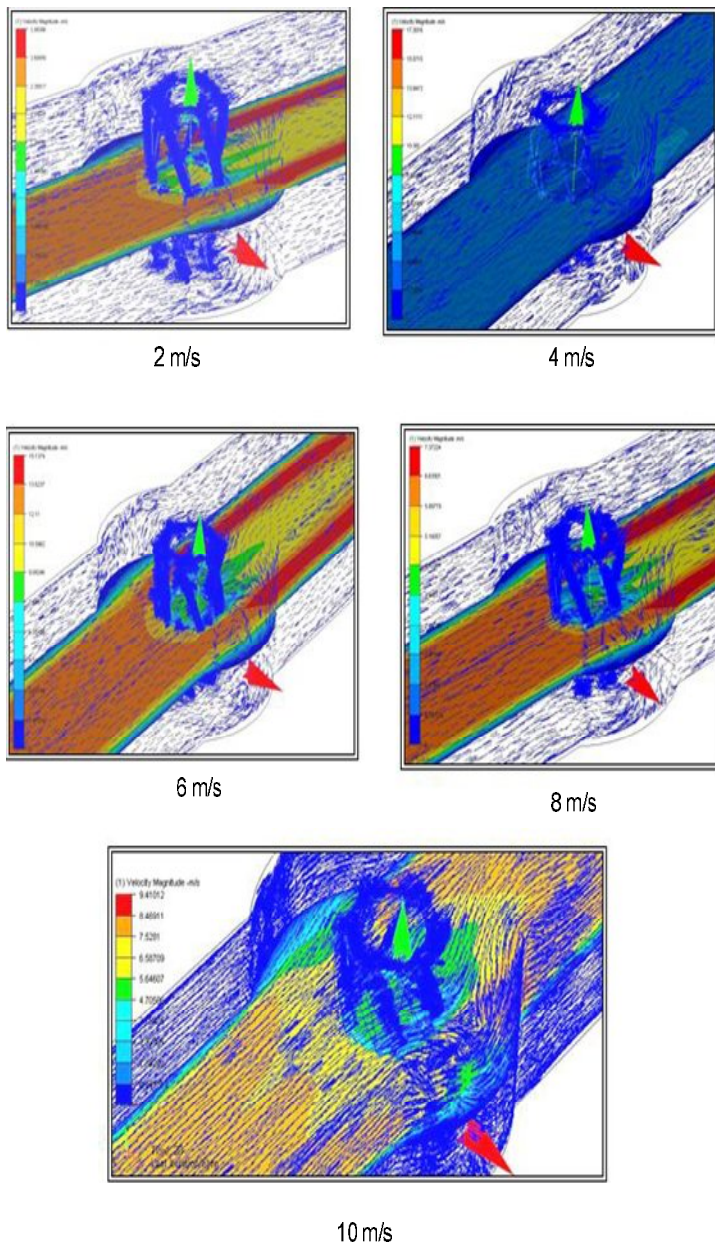
รูปที่ 3 แสดงขนาดของเอลิเมนต์



รูปที่ 4 แสดงองค์ประกอบเอลิเมนต์ที่จุดต่อสำหรับการคำนวณ

### 3. ผลลัพธ์และการวิจารณ์

รูปที่ 4 แสดงเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากการหมุนแบบ (Free Spinning) ที่สภาวะจำลองผลการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแกนตั้งที่ความเร็ว 2, 4, 6, 8, 10 m/s โดยที่ลมจะเข้ามาในทิศทางของแกน x กังหันลมจะหมุนรอบแกน z จะได้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นดังรูป

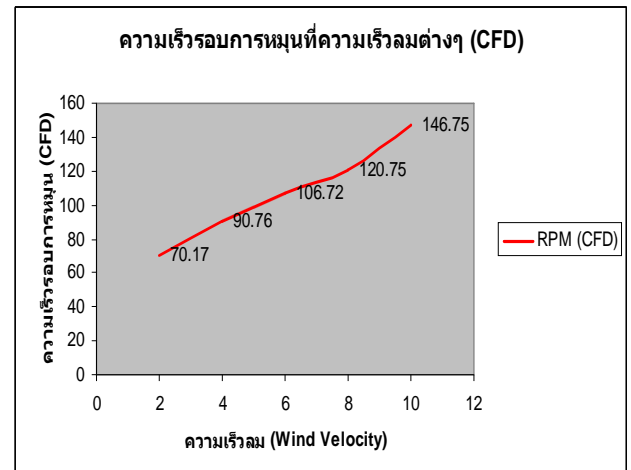


รูปที่ 4 แสดงผลการคำนวณ (CFD) เพื่อหาความเร็วรอบการหมุน

ในภาพรวมจะเห็นได้จากผลการทดลอง ความเร็วที่บริเวณพื้นที่การกวาดของใบกังหันลมมีค่าต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับพลังงานที่ได้จากลมของกังหันลมแกนตั้ง และบริเวณความเร็วลมต่ำนั้นเกิดการ

บานออกจากใบกังหันที่อยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ความเร็ว หลังจากผ่านใบกังหันลม และอากาศจะเกิดการม้วนตัวเกิดขึ้น [2]

จากผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ในรูปแบบการคำนวณผลแบบ (Free Spinning) เพื่อหาความเร็วรอบการหมุนที่เหมาะสม ที่ความเร็วลม 2, 4, 6, 8, 10 m/s สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้งานกับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีก (Tip Speed Ratio, TSR) ที่มีความสอดคล้องกับรอบการหมุนที่ทำให้เกิดแรงบิด ที่จะนำไปคิดเพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในการออกแบบกังหันลม หาได้จากสมการดังนี้

$$x = \frac{\Omega R}{V} \quad (4)$$

เมื่อ  $\Omega$  คือ ความเร็วรอบการหมุน ( Rotational Speed)  $R$  รัศมีของการหมุน (Rotor Radius) และ  $V$  คือ ความเร็วที่ใช้งาน ที่ปล่อยเข้าสู่โมเดลจำลอง ในการหาค่า (Tip Speed Ratio, TSR) สามารถกำหนดค่า  $x$  เพื่อใช้ในการคำนวณรอบการหมุนเบื้องต้นได้ ด้วยการสมมุติค่า  $x$  ขึ้นมาหนึ่งค่า เพื่อใช้เป็นทฤษฎีเทียบกับการคำนวณผลแบบ (Free Spinning) ที่ได้ผลการคำนวณทาง (CFD) ในที่นี้ ให้กำหนดค่า  $x = 1$  เป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบที่ความเร็วลม 2 m/s



$$x = \frac{U}{V} = \frac{R\Omega}{V}$$

$$1 = \frac{0.25m \times 2\pi N / 60}{2m / s}$$

$$2 = 0.25m \times 2\pi N / 60$$

$$60 \times 2 = 0.25m \times 2\pi \cdot N$$

$$120 = 0.25m \times 6.28 \cdot N$$

$$\frac{120}{6.28} = 0.25m \times N$$

$$19.10 = 0.25m \times N$$

$$\frac{19.10}{0.25} = N$$

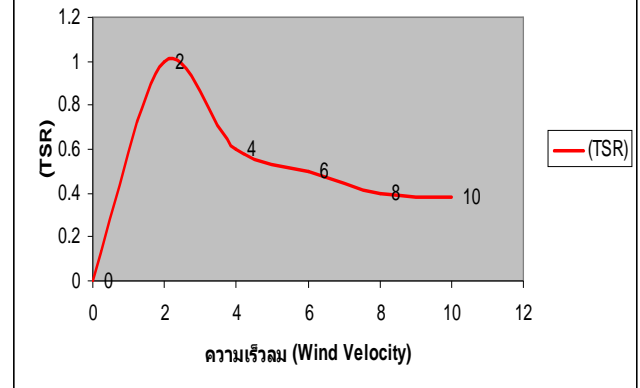
$$76.4 = N$$

จากผลการคำนวณความเร็วรอบการหมุนทางทฤษฎี ได้ค่าความเร็วรอบเท่ากับ 76.4 RPM เมื่อนำไปเทียบกับผลที่ได้ทาง (CFD) จากรูปที่ 5 ได้ค่าความเร็วรอบ = 70.17 RPM ผลที่ได้ใกล้เคียงกัน คิด % error = 8.15% เพราะฉะนั้นสามารถใช้ค่า (Tip Speed Ratio, TSR)  $x = 1$  ในการออกแบบกังหันลมแกนตั้งได้ที่ความเร็วลม 2 m/s ส่วนที่ความเร็วลมอื่นๆสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบ

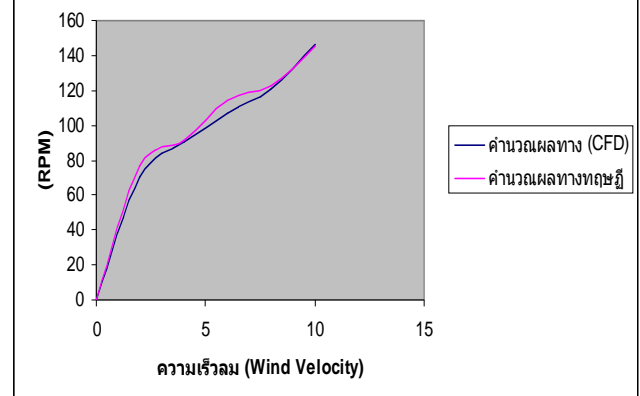
ความเร็วลม (Wind Velocity)	ความเร็วรอบการหมุน (RPM) ที่ได้จาก (CFD)	ความเร็วรอบการหมุน (RPM) ที่ได้จาก ทฤษฎี	ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีก (TSR)	% error
2 m/s	70.14	76.40	X = 1	8.15
4 m/s	90.76	91.71	X = 0.6	1.04
6 m/s	106.72	114.64	X = 0.5	6.90
8 m/s	120.75	122.29	X = 0.4	1.25
10 m/s	146.57	145.22	X = 0.38	0.92

การเปรียบเทียบความเร็วลมกับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีก (TSR)



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีกที่ความเร็วลมต่างๆ

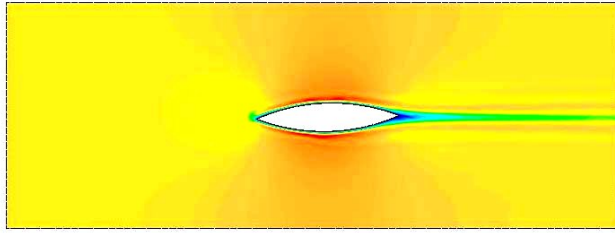
การเปรียบเทียบผลการคำนวณ



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วรอบการหมุนที่ได้ทาง (CFD) กับทางทฤษฎี

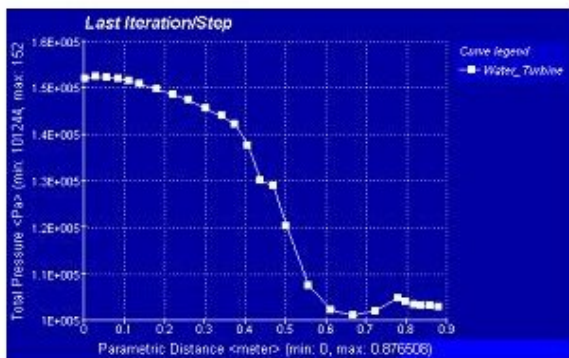
ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีก (Tip Speed Ratio, TSR) จะมีการแปรผกผันกับรัศมีของกังหันลมกับความเร็วลมที่ใช้งาน ถ้าอัตราส่วนความเร็วปลายปีกมีค่ามากเกินไป ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกซึ่งแปรตามมุมปะทะจะน้อยลงตามไปด้วย จะส่งผลให้แรงที่กระทำต่อกังหันลดลงและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกังหันลมลดลงตามไปด้วย [3]

จากการแปรค่าแรงบิดเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมประทะ และความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าสู่หน้าตัดของใบกังหันลมบริเวณใกล้ปีกกังหันลมแกนตั้ง แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 8 แสดงความเร็วสัมพัทธ์บริเวณใกล้ปีกกังหันลมแกนตั้ง

ความเร็วลมใช้งานที่ต่างกันนั้น ทำให้ได้พลังงานที่ได้จากลม นำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่างกันไปด้วย เพราะทิศทางของความเร็วลมกับความเร็วขณะที่กังหันกำลังหมุนจะสัมพันธ์กันทางทฤษฎี เมื่อกังหันลมเริ่มหมุนความเร็วลมที่เข้ามาปะทะกับใบกังหันลมมีทิศทางเปลี่ยนไปจึงทำให้มุมประทะเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและจะส่งผลถึงแรงบิดใช้งานด้วย



รูปที่ 8 แสดงผลรวมความดันที่จุดต่างๆในกังหันลมแกนตั้งบริเวณทางเข้าจนถึงจากออกของลมในอุโมงค์ลมจำลอง (CFD)

#### 4. สรุปผลและวิเคราะห์ผล

การคำนวณผลและจำลองสนามการไหลของอากาศภายในอุโมงค์ลมจำลองของกังหันลมแกนตั้งด้วยโปรแกรม Cfdesign เพื่อหาความเร็วรอบการหมุนที่เหมาะสมภายใต้การวิเคราะห์ผลแบบ (Free Spinning) เทียบกับการ

คำนวณผลต่างระหว่างอัตราส่วนความเร็วปลายปีก (Tip Speed Ratio, TSR) เพื่อหาความเร็วรอบการหมุนใช้งานจริงที่ความเร็วลมต่างกัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการออกแบบและเลือกใช้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบเฟืองทด งานวิจัยนี้ถือว่าประสบความสำเร็จในขั้นต้น ในการหาผลเฉลยต่างๆที่อยู่ในรูปแบบของความเร็วรอบการหมุน ความดัน ที่สนามการไหลและสามารถนำมาวิเคราะห์และพัฒนากังหันลมแกนตั้งได้ในอนาคตต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่าน ในทีมงานกังหันลมความเร็วลมต่ำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่คอยให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Blazek, J., 2001. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications., Elsevier, Netherlands.
- [2] Freris, L.L., 1990. Wind Energy Conversion System. Prentice Hall, Great Britain.
- [3] Wilson, R.E. and Mckie, W.R. 1978. A comparison of aerodynamic analyses for the Darrieus rotor. Proc, Int. Wind Energy system, BHRA, Amsterdam.
- [4] Eggleston, D.M. and Stoddard F.S. Wind Turbine Engineering Design", Van Nostrand Company, 1987
- [5] Lindenburt C. Investigation into rotor blade aerodynamics. ECN-C-03-025, July 2003
- [6] Spera, A.D., Wind Turbine Technology: Fundamental Concept of Wind Turbine Engineering", ASME Press, 1994
- [7] Manwell, J. F., McGowan J.G. and Rogers A.L., "Wind Energy Explained", John Wiley & Son, 2002
- [8] A.T. 1992. Hydraulic Compressible Flow Turbo machines, McGraw-Hill (UK)

- [9] Gatski T.B., "Turbulent Flows : Model Equations  
And Solution Methodology", in Handbook Of  
Computational Fluid Mechanics, Edited By  
Roger Peyret, Academic Press Ltd, (1986),  
London

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ ชื่อสกุล	นายวีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล
วัน/เดือน/ปีเกิด	วันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ.2526
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลภูมิพล จังหวัดตาก
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	326 หมู่ 2 ต.ดงคู่ อ.ศรีสันดาลย์ จ.สุโขทัย 64130

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2546	จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส) สาขาวิชา ช่างกลเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พิษณุโลก
พ.ศ. 2549	จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร สาขาวิชา วิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (คลองหก)

### ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2549-2551	วิศวกร ฝ่ายออกแบบ แผนกวิศวกรรม บริษัท USC (Thailand) Steel Detailing Engineering จำกัด
พ.ศ. 2551-2552	วิศวกร ฝ่ายงานวิจัยและพัฒนา (R&D) บริษัทยูโรเทค เมนูเฟลเจอร์ริง ประเทศไทย (จำกัด) มหาชน

### ผลงานการตีพิมพ์

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์  
วิเคราะห์พลศาสตร์การไหล งานการประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 1 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร วันที่ 15-16 ธันวาคม พ.ศ. 2551

การใช้ CFD ในการคำนวณหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของกังหันลมแกนตั้ง งานการประชุม  
วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5 (E-NETT) คณะวิทยาศาสตร์ วิทยาลัยพลังงาน  
ทดแทน และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร วันที่ 29 เมษายน - 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2552